

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**VLIV OKOLNÍCH PODMÍNEK NA MODUL
PRUŽNOSTI BETONU**

INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON THE MODULUS OF ELASTICITY
OF CONCRETE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Peřina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KLÁRA KŘÍŽOVÁ, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Tomáš Peřina
Název	Vliv okolních podmínek na modul pružnosti betonu
Vedoucí práce	Ing. Klára Křížová, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Odborné tuzemské i zahraniční časopisy, sborníky z tematických konferencí a symposií a internetové odkazy z daného oboru.

Doporučeny jsou zejména: sciencedirect.com, normy ČSN, Beton TKS, apod.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Modul pružnosti betonu je základní přetvárnostní charakteristikou betonu, tudíž mechanický parametr definující pružné deformace betonu. Při realizaci konstrukcí se nejčastěji používá jako základní stavební materiál beton. Proto je nutné vědět, jaké činitele ovlivňují především rychlost nárůstu pevnosti betonu, případně modulu pružnosti, což ovlivňuje i rychlost výstavby.

Bakalářská práce by měla popsat současný stav v oblasti modulu pružnosti betonu, jak na tuzemské, tak zahraniční scéně technologie betonu.

Podstatou práce je získání přehledné rešerše popisující jaké faktory a jak výrazně ovlivňují zejména statický modul pružnosti betonu v tlaku.

Práce by měla popsat současné poznatky v oblasti modulu pružnosti, principy a průběhy testování dle současných platných i zaniklých normových postupů, definici a průběh deformace betonu, vliv použití jednotlivých vstupních surovin atd. Experimentální část práce bude zaměřena na sledování modulu pružnosti pro betony uložené v laboratorním, vodním a venkovním prostředí, které by se mělo přiblížit k podmínkám během realizace staveb.

Na základě dosavadních zkušeností sestavit 4 návrhy složení betonů lišících se zejména typem použitých příměsí. Na zkušebních tělesech stanovit základní fyzikálně-mechanické vlastnosti a zejména statický modul pružnosti v tlaku. Výsledkem práce by mělo být získání přehledu o hodnotách modulu pružnosti v závislosti na podmínkách uložení zkušebních těles během jejich zrání do požadovaného stáří.

Rozsah: min. 45 stran

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Klára Křížová, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Stále více se modul pružnosti betonu se dostává do popředí zájmu. V minulosti byl do jisté míry opomíjen a nebyl na něj brán dostatečný zřetel. Teoretická část bakalářské práce má popsat jaké faktory ovlivňující zejména statický modul pružnosti betonu v tlaku. Praktická část práce je zaměřena na sledování modulu pružnosti betonů, lišících se na typu prostředí uložených zkušebních těles. Betony budou uloženy ve venkovním, vodním a laboratorním prostředí. Navržené receptury betonů se budou lišit především použitým typem příměsi, ale i cementu. Výsledné hodnoty budou porovnány v závislosti na podmínkách uložení zkušebních těles.

Klíčová slova

Beton, modul pružnosti betonu, pevnost betonu, deformace, kamenivo, okolní podmínky

Abstract

Increasingly, the modulus of elasticity of concrete is at the forefront of interest. In the past, it has been neglected to some reason and not taken into due consideration. The theoretical part of the bachelor thesis is to study of factors influencing the static modulus of elasticity in compression. The practical part is focused on monitoring the modulus of elasticity of concrete, based on the different type of the environment stored test specimens. Concrete will be stored outdoor in the water and in the laboratory environment conditions. Designed concrete mixes will be primarily different with the used of type of admixtures but also with type of cement. The result values will be compared on the dependence of environmental conditions of the test specimens.

Key words

Concrete, modulus of elasticity of concrete, compressive strength, deformation, aggregate, environmental conditions

Bibliografická citace

Tomáš Peřina *Vliv okolních podmínek na modul pružnosti betonu*. Brno, 2017. 59 s.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Klára Křížová, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2017

Tomáš Peřina

autor práce

Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Kláře Křížové, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a trpělivost, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnovala.

OBSAH

1	Úvod.....	10
2	Cíle práce	11
3	Teoretická část práce	12
3.1	Beton.....	12
3.2	Deformace betonu.....	12
3.2.1	Hookeův zákon	13
3.2.2	Modul pružnosti betonu.....	14
3.2.3	Metody zjišťování modulu pružnosti.....	16
3.2.4	Statický modul pružnosti v tlaku dle ČSN ISO 6784 a dle ČSN EN 12390-13	17
3.2.5	Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku	18
3.2.6	Modul pružnosti versus pevnostní třída betonu.....	20
3.2.7	ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby	22
3.3	Faktory ovlivňující modul pružnosti.....	23
3.3.1	Technologické vlivy	24
3.3.2	Zkušební vlivy	29
4	Praktická část práce	32
4.1	Metodika práce	32
4.1.1	Výpis použitých suroviny	33
4.1.2	Přehled navržených receptur.....	34
4.1.3	Stanovení konzistence čerstvého betonu	36
4.1.4	Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu	37
4.1.5	Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu.....	38
4.1.6	Stanovení pevnosti v tlaku zkušebních těles.....	39
4.1.7	Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku	39

4.2	Diskuze výsledků	41
4.2.1	Sledované vlastnosti čerstvého betonu	41
4.2.2	Sledované vlastnosti ztvrdlého betonu	41
5	Závěr	52
6	Seznam použité literatury	54
7	Seznam použitých norem.....	56
8	Seznam použitých zkratek a symbolů.....	57
9	Seznam obrázků	57
10	Seznam tabulek	58
11	Seznam grafů	59

1 ÚVOD

Beton je velice proměnlivým materiálem, z jehož složení se odvíjí výsledné vlastnosti. Toto složení může být pro beton se stejnou specifikací velmi odlišné, a tedy i parametry specifikovaného betonu mohou být různorodé. Ze statického pohledu se předpokládá, že ke každé pevnostní třídě je přiřazena jedna konkrétní hodnota modulu pružnosti. Z technologického pohledu jsou k pevnostním třídám přiřazeny stupně vlivu prostředí, které ovlivňují složení betonu a mají tak mnohem výraznější vliv na jeho pevnost. Tedy, vyrobený beton nemusí splňovat podmínky, se kterými bylo počítáno v jeho návrhu v konstrukci [1].

Při navrhování a statickém výpočtu konstrukcí se modul pružnosti odvozuje z pevnostní třídy betonu a používají se hodnoty, které vycházejí z výsledků starších než 30 let. Za tuto dobu se beton z hlediska technologie významně rozvinul. Modul pružnosti je důležitým parametrem betonu, především při výpočtu deformací nebo dotvarování. Projektant by měl tedy předepsat požadovanou hodnotu modulu pružnosti ve specifikaci betonu, pro konstrukce citlivé na modul pružnosti [2].

Z hlediska technologického modul pružnosti závisí na typu použitých surovin, ale i na druhu zkušební metody, kterou je stanovován.

V posledních letech tak je modul pružnosti velmi probíraným tématem.

2 CÍLE PRÁCE

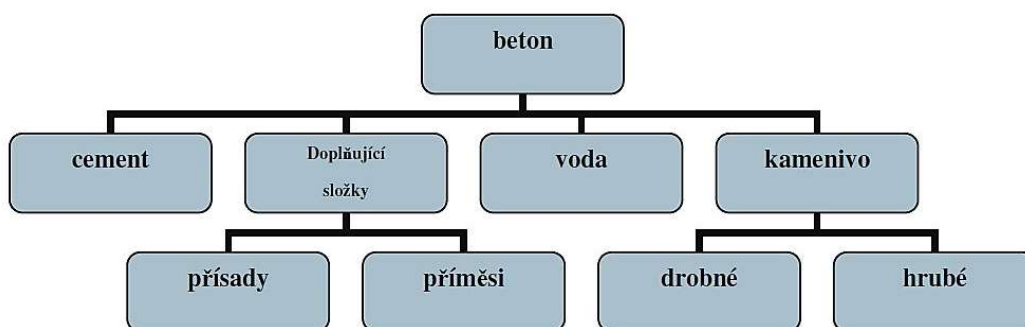
Cílem teoretické části bakalářské práce je posouzení faktorů, a to jakým způsobem tyto faktory ovlivňují statický modul pružnosti betonu v tlaku. Práce má popsat definici a průběh deformace betonu, metody a průběhy testování dle platných i zaniklých normových postupů i samotný vliv zkušebních metod na získané hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku. Dále má zhodnotit dopad používaných vstupních surovin při výrobě na modul pružnosti betonu v tlaku.

Úkolem praktické části práce je navržení čtyř receptur betonů a stanovení fyzikálně-mechanických vlastností na vyrobených zkušebních tělesech, především statický modul pružnosti v tlaku a pevnost v tlaku. Výsledkem je vyhodnocení požadovaných vlastností po 7 a 28 dnech zrání v závislosti na uloženém prostředí. Zkušební tělesa budou uložena ve třech různých prostředích, a to ve venkovním, vodním a laboratorním.

3 TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

3.1 Beton

Beton je definovaný jako kompozitní stavební materiál, který je složen z pojiva (cementu), z plniva (drobného a hrubého kameniva) a vody, z přísad a příměsí nebo bez nich [3]. Díky hydrataci cementu beton získává své specifické vlastnosti, kterými je charakterizován. Beton je mnohofázová látka složená z různě velikých zrn kameniva, ze zrn nezhydratovaného cementu, cementového gelu a různě velikých pórů. Převážnou část objemu betonu zaujímají tuhé fáze. Fáze tvořící rozptýlené částice, se označuje jako dispergovaná fáze a druhá fáze, která tyto částice nese je fází disperzní, často označovaná jako matrice. Nejpoužívanější matricí je pak cementový kámen [4]. Nejdůležitějšími vlastnostmi betonu je pevnost, přetvárnost, objemové změny, trvanlivost a případně vodotěsnost. Beton je velmi důležitý konstrukční materiál současnosti i budoucnosti [5].



Obrázek 1. Přehled jednotlivých složek betonu [4]

3.2 Deformace betonu

Beton je definovaný jako třífázový anizotropní křehký materiál, který se chová odlišně pod vlivem různého napětí. Beton se chová pružně jen při malém napětí. Teoreticky se tato hodnota rovná 30-40 % pevnosti v tlaku. Proto je beton při konstrukčním navrhování brán jako elastický materiál [6].

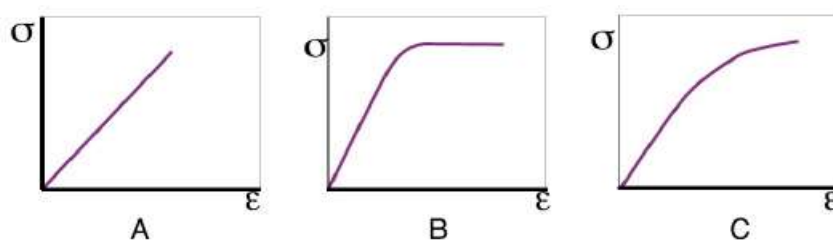
Na každou stavební konstrukci nebo konstrukční nosný prvek působí okolní prostředí svými účinky. V konstrukci tak dochází k různým fyzikálním nebo mechanickým změnám. Díky změnám hladin statického napětí dochází ke změně tvaru neboli deformaci, která je měřitelná [3].

Deformace těles jsou zásadně dělena na [3]:

- **Deformace pružné (elastické)**
- **Deformace nepružné (plastické)**

Jestliže po odstranění napětí vymizí z betonu všechny deformace, jedná se o deformaci pružnou [3]. Ta je popisována modulem pružnosti, teplotní roztažností a částečně smrštěním betonu [3]. Pokud po odstranění napětí v betonu přetrvají nějaké deformace, jedná se o deformaci nepružnou a deformace tak zůstává ve formě stálých přetvoření [3]. V tomto případě je to způsobeno dotvarováním betonu, dlouhodobým zatížením, vysycháním v průběhu hydratace cementu a smrštěním vlivem karbonatace betonu [3].

Deformace betonu popisuje křivka v diagramu σ - ϵ , velikost deformace je závislá na napětí v průřezu. Z různých tvarů těchto křivek, se materiály dělí na **lineárně pružné (A)**, **pružně-plastické (B)** a **nelineárně pružné (C)**. Pokud materiál po odlehčení nevykazuje žádné deformace, jedná se o ideálně pružný materiál. Tento stav popisuje Hookeův zákon [7].



Obrázek 2. Základní typy pracovních diagramů [7]

3.2.1 Hookeův zákon

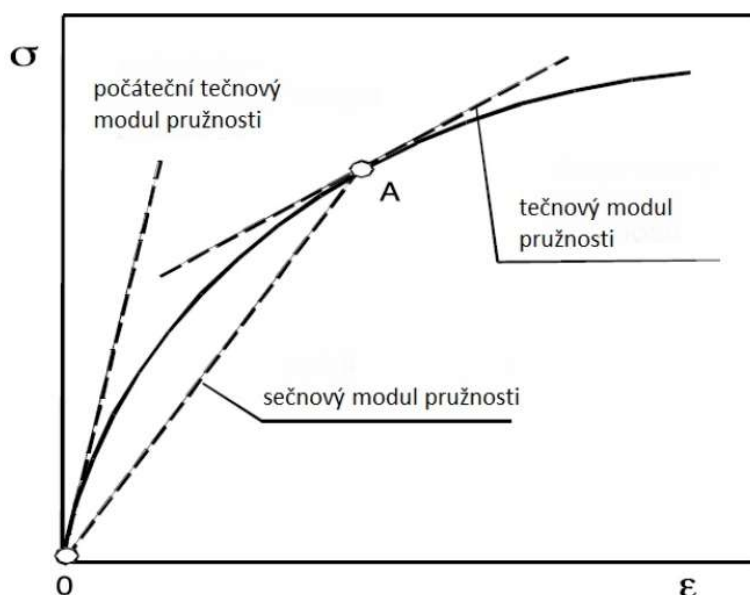
Deformace betonu je nejlépe charakterizována pracovním diagramem betonu [3]. Závislost mezi napětím a přetvořením není lineární, neplatí tak v plném rozsahu Hookeův zákon [5].

Beton, který je řazen mezi nelineárně pružné materiály, má pracovní diagram výrazně složitější. I když se zdá, že v počáteční fázi se křivka pohybuje dle Hookeova zákona, tak při podrobnějším zkoumání se zjistí, že lineární průběh není nikdy dosažen. Tento stav je způsoben kvalitou rozhraní mezi matricí a plnivem, rychlostí deformace, složením matrice a typu plniva [8]. Pouze v počátku zatěžování se může hovořit o lineární fázi přetvoření. Modul pružnosti betonu při vyšším napětí není konstantní, naopak klesá. Při dosažení 30 % lomového napětí dochází ke vzniku trhlinek, které jsou následkem plastických deformací [3].

3.2.2 Modul pružnosti betonu

Modul pružnosti betonu E je základním materiálovým parametrem, který definuje vztah mezi napětím σ a jeho přetvořením ε a ukazuje schopnost betonu deformovat se pružně [2; 9]. Čím větší je modul pružnosti betonu, tím se při stejné hodnotě zatížení projeví menší deformace [10]. Jde o významný parametr pro mezní stavy použitelnosti i pro mezní stavy únosnosti konstrukce. Modul pružnosti je proměnnou veličinou, která závisí na několika parametrech. Je odvozen z pracovního diagramu betonu. Pracovní diagram betonu není lineární, proto ani hodnota modulu pružnosti podle Hookeova zákona není jediná [2].

Modul pružnosti betonu lze dle metody zjišťování dělit na statický a dynamický modul pružnosti. Dle závislosti napětí na přetvoření se dělí na tečnový a sečnový modul pružnosti [10].



Obrázek 3. Znázornění tečnového a sečnového modulu pružnosti [7]

Pro stanovení modulu pružnosti betonu využíváme sečnového modulu pružnosti. Při rostoucím napětí klesá hodnota směrnice sečny a tím i hodnota modulu pružnosti [7].

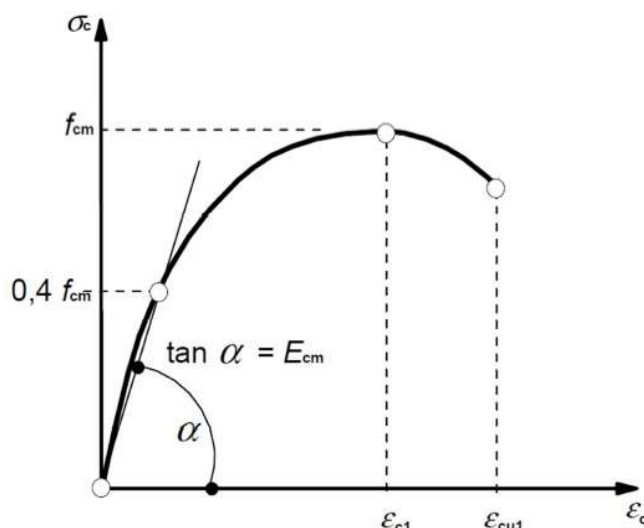
3.2.2.1 Statický modul pružnosti

Statický neboli sečnový modul pružnosti se stanoví jako poměr mezi napětím a tomu odpovídající deformací. Napětí při stanovení modulu pružnosti nepřesahuje 40 % pevnosti betonu v tlaku. Při výpočtech stavebních konstrukcí se vychází z předpokladu jejich pružného spolupůsobení [7].

Uvažuje se platnost Hookeova zákona, tedy přímá úměra mezi napětím a poměrnou deformací ze vztahu [2]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

kde E je modul pružnosti v GPa, σ je napětí v MPa a ε je poměrné pružné přetvoření [2].



Obrázek 4. Vyjádření sečnového modulu pružnosti E_{cm} pomocí deformačního diagramu betonu v tlaku [11]

3.2.2.2 Dynamický modul pružnosti

Dynamický modul pružnosti se stanovuje při zjišťování nadměrných průhybů u stavební konstrukce [12]. Odpovídá počátečnímu tečnovému modulu pružnosti ze statické zkoušky, který bývá výrazně větší. Proto je třeba dynamický modul pružnosti pomocí předepsaných koeficientů převést na používaný statický modul pružnosti [12]. Tento jednoduchý vztah definoval Lydon a Balendran [13]:

$$E_c = 0,83 \cdot E_d \quad (2)$$

kde E_c je statický modul pružnosti betonu v GPa, E_d je dynamický modul pružnosti betonu v GPa a 0,83 je empiricky odvozený součinitel [13].

3.2.2.3 Modul pružnosti v tahu

Přestože je tahová únosnost betonu velmi omezená, tak modul pružnosti v tahu je důležitý. Hodnota modulu pružnosti v tahu E' může nabývat menších i větších hodnot oproti modulu pružnosti v tlaku. Jeho hodnota závisí především na druhu použitého kameniva [14].

Je vhodné, aby modul pružnosti v tahu byl malý, protože je možný vznik trhlin způsobených objemovými změnami. Stanovení modulu se provádí při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu [15].

3.2.2.4 Modul pružnosti ve smyku

Modul pružnosti ve smyku G_b se stanoví z modulu pružnosti v tlaku E_c ze vztahu [16]:

$$G_b = \frac{E_c}{2 \cdot (1 + \nu_b)} \cong 0,42 \cdot E_c \quad (3)$$

kde E_c je modul pružnosti v tlaku GPa a ν_b je součinitel příčného přetvoření a uvažuje se hodnota 0,2 [16].

3.2.3 Metody zjišťování modulu pružnosti

Podle platných českých norem je v podstatě pět způsobů stanovení modulu pružnosti betonu [2].

Tabulka 1. Rozdělení metod zjišťování modulu pružnosti [2]

Metoda	Typ zkoušky	Norma
statická	v tlaku	ČSN ISO 1920-10
		ČSN EN 12390-13
	tah za ohybu	ČSN 73 6174
dynamická	ultrazvuková	ČSN 73 1371
		ČSN EN 12504-4
	rezonanční	ČSN 73 1372
odvozená	-	empirické vztahy
	-	převodní vztahy
	-	teoretické vztahy

3.2.3.1 Statické metody stanovení modulu pružnosti

Statické metody jsou založeny na zatěžování zkušebních těles v lisu tlakem nebo ohybem a ke stanovení modulu pružnosti vycházejí z Hookeova zákona. Tyto metody řadíme mezi destruktivní zkoušky, kdy je zkušební těleso zatíženo silou až do jeho porušení. Ke stanovení modulu pružnosti je třeba vyvodit změnu napětí a při této změně určit příslušnou hodnotu poměrné pružné deformace. Stanovený modul pružnosti je pak modulem sečnovým [2].

3.2.3.2 Dynamické metody stanovení modulu pružnosti

Tyto metody využívají fyzikálního zákona pro rychlost šíření pružného vlnění ve hmotě a jsou založeny na elektroakustických principech. Tyto metody nezpůsobují žádné porušení ve hmotě, proto je nazýváme nedestruktivními. Rezonanční metoda je určena spíše pro zkoušení menších těles, ultrazvukovou metodu lze využít pro zkoušení stavebních prvků, dílců a konstrukcí. Obě uvedené metody se používají jako doplňkové, nejsou přímo

srovnatelné se zkouškami statického modulu pružnosti [2]. Nevýhodou těchto metod je nutnost přepočítání získaných dynamických modulů na statický modul pružnosti, pomocí zmenšovacích součinitelů [17].

3.2.3.3 Odvozené metody stanovení modulu pružnosti

Empirické vztahy využívají vztah modulu pružnosti betonu k pevnosti betonu, popř. k objemové hmotnosti. **Převodní vztahy** využívají souvislost mezi dynamickým a statickým modulem pružnosti. **Teoretické vztahy** využívají méně či více komplikované modely, které určitým způsobem vystihují elastické chování betonu. Všechny tyto vztahy jsou použitelné jen pro konkrétní druh betonu, pro který byly stanoveny. Je to dáno především značnou variabilitou jednotlivých druhů betonu i ve stejné pevnostní třídě [2].

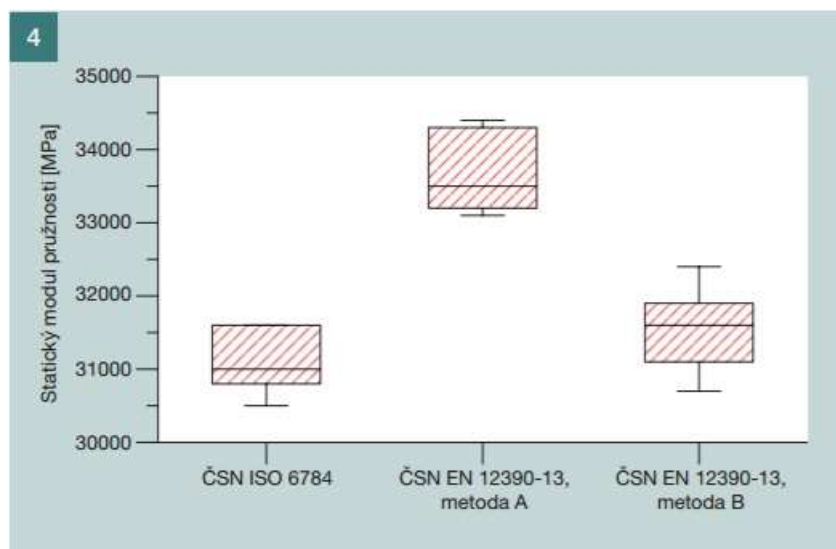
3.2.4 Statický modul pružnosti v tlaku dle ČSN ISO 6784 a dle ČSN EN 12390-13

Od roku 1993 do ledna roku 2014 byla pro stanovení statického modulu pružnosti v tlaku platná pouze norma ČSN ISO 6784 [18]. Od února 2014 je možné využít normu ČSN EN 12390-13 [19], což vedlo k souběhu norem až do 1. 1. 2015, kdy byla norma [18] zrušena [17].

Autoři článku [17] porovnávali zkušební postupy v uvedených normách [18] a [19], především pak změnu v normě [19], kdy je možné zkoušet modul pružnosti podle dvou metod. **Metoda A** umožňuje kromě klasického statického modulu pružnosti $E_{c,s}$, určit také počáteční sečnový modul pružnosti v tlaku $E_{c,0}$. **Metoda B** je pouze mírně upravený postup zkoušení dle normy [18].

Za účelem porovnání zkušebních postupů, bylo vyrobeno celkem dvacet pět zkušebních těles tvaru válce o rozměrech 150×300 mm. Pro definovanou zatěžovací hodnotu zkoušek modulu pružnosti byla pevnost v tlaku stanovena na krychlích o rozměrech $150 \times 150 \times 150$ mm. Všechna tělesa byla vyrobena z jedné výrobní dávky čerstvého betonu, byla uložena do stejného typu forem a ošetřována stejným způsobem [17].

Grafické zobrazení výsledků je uvedeno v následujícím obrázku [17]:



Obrázek 5. Grafické krabicové zobrazení zkoušek statického modulu pružnosti v tlaku dle ČSN ISO 6784 a ČSN EN 12390-13 [17]

Hodnoty statického modulu pružnosti se výrazně liší v závislosti na použité zkušební metodě. Je tedy velmi důležité, aby projektant přesně definoval zkušební postup, jakým mám být statický modul pružnosti určen. Dále autoři článku [17] poukazují na některé nejasnosti v nové normě [19; 17]:

- nedostatečné vysvětlení pojmu počáteční modul pružnosti $E_{c,0}$,
- horní zatěžovací mez cyklů zůstává definovaná jako $1/3 f_c$, ale platné návrhové předpisy betonových konstrukcí udávají hodnotu statického sečnového modulu pružnosti betonu v tlaku $0,4 f_c$.

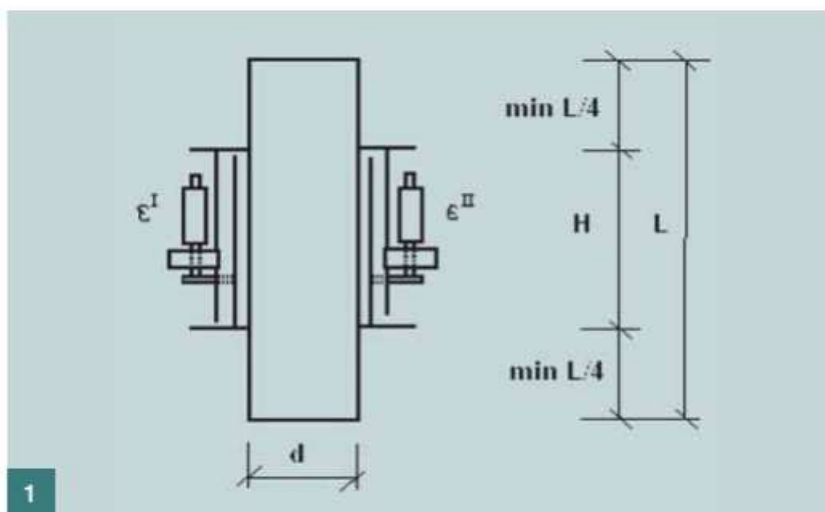
3.2.5 Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku

Norma ČSN ISO 1920-10 [20] nahradila dřívější používanou normu ČSN ISO 6784 [18]. Postup zkoušky v těchto normách se žádným výrazným způsobem nezměnil a není potřeba měnit dlouhodobě zavedené postupy. Jedná se o zkoušku pro stanovení sečnového modulu pružnosti [2].

Norma [20] určuje metodu pro stanovení statického modulu pružnosti v tlaku ztvrdlého betonu na zkušebních tělesech, která mohou být vyrobena nebo odebrána z konstrukce.

Zkušební lis musí umožňovat vyvození požadovaného zatížení se stanoveným časovým nárůstem napětí a jeho udržování na požadované hodnotě. Přístroje pro měření změn délky nesmí mít měřicí základnu menší než $2/3$ průměru zkušební tělesa ($2/3 d$) a

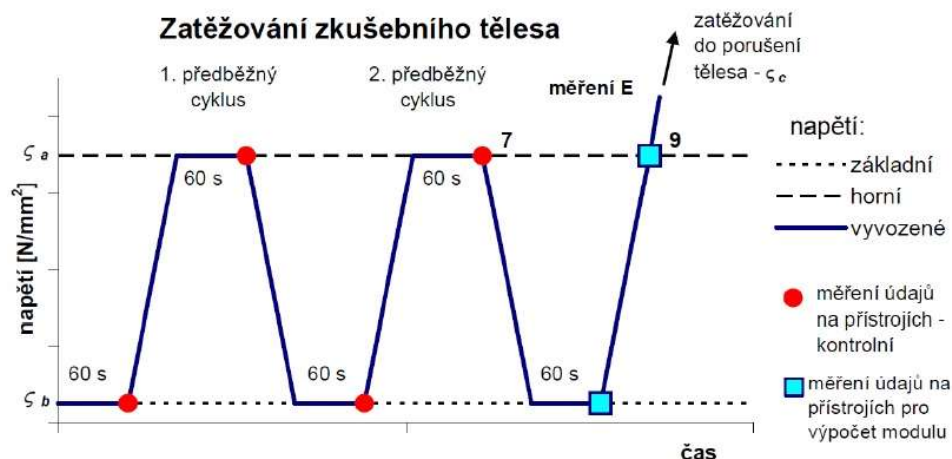
nesmí být větší než jeho průměr (d). Musí být připevněný tak, aby měřené body byly stejně vzdálené od obou konců zkušební tělesa a ve vzdálenosti od jeho konců rovné alespoň jedné 1/4 délky zkušební tělesa ($L/4$) [20].



Obrázek 6. Umístění snímačů deformací na zkušebním tělese [21]

Nejprve stanoví pevnost betonu v tlaku na zkušebních tělesech vyrobených ze stejného betonu a za stejných ošetřovacích podmínek jako zkušební tělesa pro stanovení statického modulu pružnosti [20].

Zkušební těleso s osově osazenými přístroji se vloží dostředně do zkušební lisu. Vyvodí se základní napětí σ_b 0,5 MPa, udržuje se po dobu 60 sekund, poté se odečtou a zaznamenají údaje na všech přístrojích. Napětí se plynule zvyšuje, dokud se nerovná 1/3 pevnosti betonu v tlaku ($\sigma_a = F_c/3$). Napětí se udržuje po dobu 60 sekund, v následujících 30 sekundách se odečtou a zaznamenají hodnoty na všech přístrojích. Jestliže nejsou jednotlivá přetvoření v rozmezí $\pm 20\%$ od své průměrné hodnoty σ_a , opraví se centrace zkušební vzorku a zkouška se opakuje. Jestliže je centrování dostatečně přesné, sníží se zatížení na základní napětí σ_b . Tento předběžný cyklus se opakuje nejméně dvakrát. Po dokončení posledního předběžného cyklu se vyčká 60 sekund při napětí σ_b a během 30 sekund se zaznamenají poměrná přetvoření ε_b . Zkušební těleso se opět zatíží na napětí σ_a , které se udržuje 60 sekund a během 30 sekund se zaznamenají poměrná přetvoření ε_a . Po dokončení měření se tělesa zatěžují až do porušení [20].



Obrázek 7. Zatěžovací cyklus při měření statického modulu pružnosti v tlaku [22]

Statický modul pružnosti v tlaku E_c je dán vztahem [20]:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad (9)$$

kde σ_a je horní zatěžovací napětí ($\sigma_a = F_c/3$) v MPa, σ_b je základní napětí hodnoty 0,5 MPa, ε_a je průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí a ε_b je průměrné poměrné přetvoření při základním zatěžovacím napětí. Výsledek se vyjádří v GPa na tři platné číslice. Uvedou se jednotlivě stanovené moduly pružnosti každého zkušebního tělesa a průměrná hodnota [20].

3.2.6 Modul pružnosti versus pevnostní třída betonu

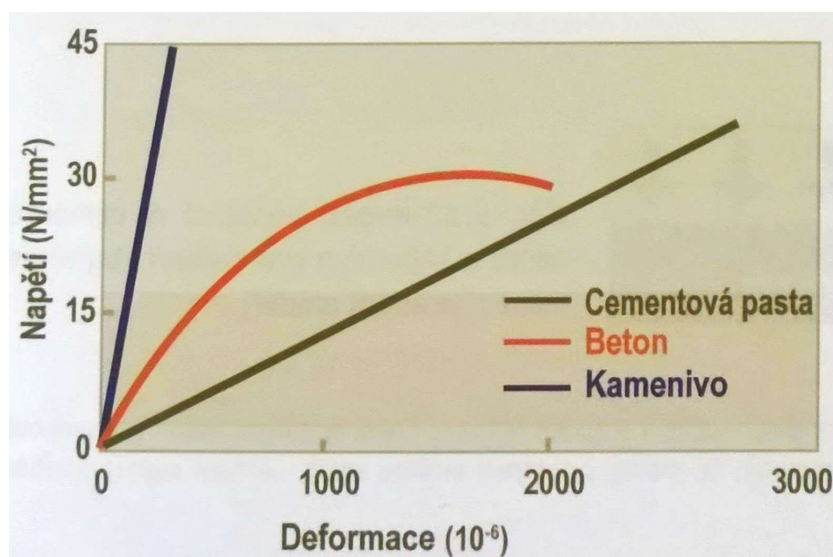
Díky moderním trendům ve stavebnictví se modul pružnosti betonu stává stále důležitější charakteristikou. Současná norma ČSN EN 206 [23] však tuto charakteristiku žádným způsobem nespecifikuje [24]. Modul pružnosti se často odvozuje z pevnosti betonu v tlaku, ze které vychází i několik normových předpisů [2]. Je nutné si však uvědomit, že závislost modulu pružnosti na pevnosti betonu v tlaku může být zavádějící, především z důvodu velké variability modulu pružnosti v rámci jedné pevnostní třídy. Tato variabilita je způsobena rozmanitostí receptur každého výrobce [24]. Projektant by měl tedy předepsat požadovanou hodnotu modulu pružnosti ve specifikaci betonu, pro konstrukce citlivé na modul pružnosti [2].

Závislost pevnosti betonu v tlaku a modulu pružnosti lze vyjádřit ze vztahu [25]:

$$E = K_E \cdot f_c^{0,5} \quad (4)$$

kde K_E je koeficient závislý na typu těles, která byla použita pro stanovení pevnosti betonu v tlaku a na počátečním modulu pružnosti (sečnovém modulu pružnosti), f_c je pevnost betonu v tlaku v MPa [25].

Tento vztah má pouze orientační charakter, protože zahrnuje pouze pevnost betonu v tlaku. Nezahrnuje samotné složky betonu, tuhé (kamenivo) a přetvárné (cementová pasta). Především modul pružnosti kameniva dosahuje větších hodnot než cementový kámen. Tento vztah popisuje následující obrázek [25]:



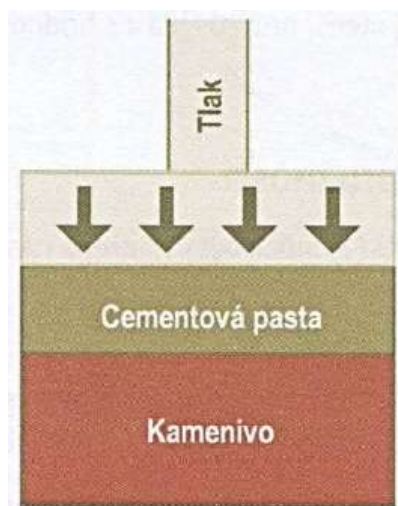
Obrázek 8. Deformace pro kamenivo, beton a cementovou pastu [25]

Modul pružnosti závisí na sklonu křivky napětí – deformace (σ - ϵ). Čím větší bude obsah kameniva v betonu, tím více se bude σ - ϵ křivka betonu blížit σ - ϵ křivce kameniva, naopak při větším množství cementu bude σ - ϵ křivka blíže σ - ϵ křivce cementové pasty. Přesnější výpočet modulu pružnosti lze určit z následujících rovnic [25]:

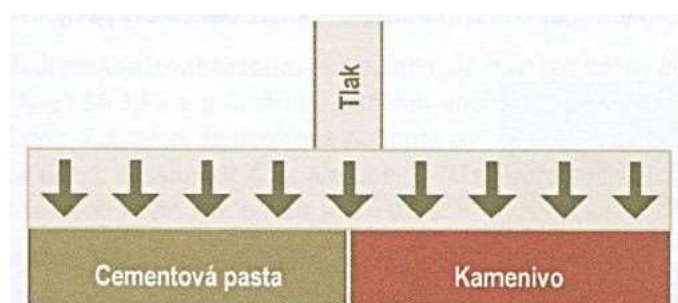
$$E_c = \frac{1}{\left(\frac{V_a}{E_a} + \frac{V_p}{E_p}\right)} \quad (5)$$

$$E_c = V_a \cdot E_a + V_c \cdot E_c \quad (6)$$

kde E_c , E_a a E_p jsou moduly pružnosti betonu, kameniva a cementové pasty, V_a a V_p jsou objemy zaujímané kamenivem a cementovou pastou. Rovnice (5) je založena na teorii kompozitního působení, kde obě složky podléhají stejnému napětí. Druhá rovnice (5) je založena na stejné deformaci obou složek [25].



Obrázek 9. Deformace kameniva a cementové pasty při stejném napětí (sériový model) [25]



Obrázek 10. Napětí působící na kamenivo a cementovou pastu při stejné deformaci (paralelní model) [25]

Výpočet modulů pružnosti podle těchto modelu je však stále přibližný. V praxi se bude hodnota modulu pružnosti pohybovat v rozmezí hodnot z rovnic (5) a (6) [25].

3.2.7 ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby

Norma ČSN EN 1992-1-1 [11] ve 3. kapitole uvádí k modulu pružnosti následující:

- Modul pružnosti betonu je uvažován jako sečnový modul a závisí na modulu pružnosti vlastních složek. Norma udává přibližnou definici modulu pružnosti E_{cm} , která je daná vztahem [11]:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left[\frac{f_{cm}}{10} \right]^{0,3} \quad (7)$$

kde E_{cm} je sečnový modul pružnosti betonu a f_{cm} je průměrná válcová tlaková pevnost odvozená z pevnosti betonu $f_{ck, cube}$ za použití vzorce [11]:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (8)$$

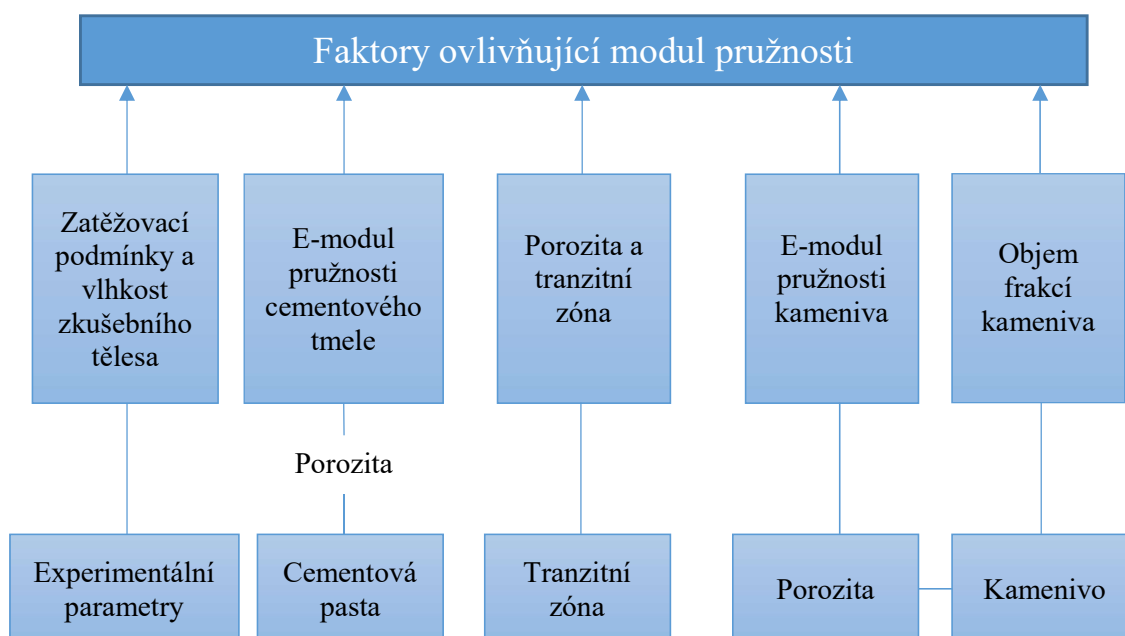
Pro vápencové kamenivo se snižuje o zhruba 10 %, pro pískovcové o 30 % a pro čedičové se naopak zvyšuje o 20 % [11].

3.3 Faktory ovlivňující modul pružnosti

Modul pružnosti je ovlivněn celou řadou faktorů. Tyto faktory lze rozdělit do dvou základních skupin [21]:

- Technologické vlivy
 - složení betonové směsi (cement, druh a množství kameniva, příměsi, přísady, vodní součinitel)
 - technologie výroby a zpracování betonové směsi (způsob a doba ošetřování betonu)
- Zkušební vlivy
 - tvar a velikost zkušebního tělesa (válce, trámce)
 - způsob získání zkušebního tělesa (vývrty z konstrukce, tělesa z forem z laboratoře)

Z pohledu složení betonové směsi má na modul pružnosti největší vliv druh a poměr mísení kameniva. A z pohledu zkoušení velikost a tvar zkušebních těles [21].



Obrázek 11. Faktory ovlivňující modul pružnosti betonu [6]

3.3.1 Technologické vlivy

3.3.1.1 Vliv kameniva

Beton je mnohasložkový materiál, který obsahuje různá množství, různý typ a poměr hrubého kameniva, což ve výsledku změní modul pružnosti betonu. Podstatně jiný modul pružnosti může mít i beton se stejným typem kameniva, ale z jiné těžební lokality [9].

V důsledku velkých rozdílů modulu pružnosti kameniva cementového kamene může dojít ke vzniku trhlin v cementovém kameni, což by mělo za následek snížení pevnosti a tím i modulu pružnosti betonu, dále by došlo i ke zhoršení trvanlivosti betonu. Rozmezí modulu pružnosti kameniva je velmi široké. Je ovlivněn mineralogickým složením, texturou a strukturou hornin, ze kterých vzniklo [26].

A. M. Neville poukázal na to, že kamenivo má větší modul pružnosti než hydratovaný cementový tmel a vyšší obsah kameniva dává ve výsledku vyšší modul pružnosti betonu [9].

Baalbaki na základě pokusů s různými typy kameniva definoval vztah, který zohledňuje typ použitého kameniva na modul pružnosti betonu v tlaku [8]:

$$E_c = K_0 + 0,2 \cdot f_c \quad (10)$$

kde E_c je modul pružnosti v tlaku, K_0 je faktor zohledňující typ kameniva a f_c je pevnost betonu v tlaku. V následující tabulce jsou uvedeny některé typy hrubého kameniva s doporučenými hodnotami koeficientu K_0 [8].

Tabulka 2. K_0 faktor pro typ kameniva [8]

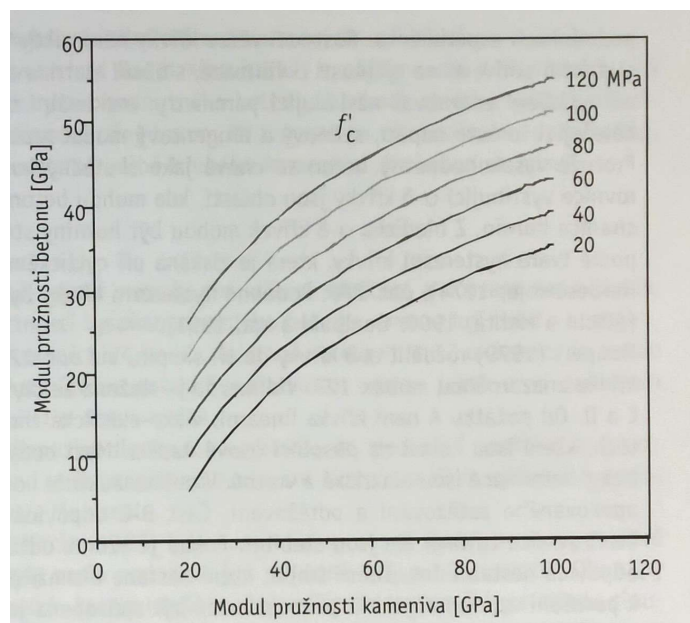
Typ kameniva	K_0 koeficient [GPa]
Pískovec	9,5
Žula	19
Vápenec	22

Dále Baalbaki dle experimentálních výsledků zahrnul do rovnice (10) i modul pružnosti kameniva, takže vztah lze zapsat ve tvaru [8]:

$$E_c = -52 + 41,6 \cdot \log(E_a) + 0,2 \cdot f_c \quad (11)$$

kde E_a je modul pružnosti hrubého kameniva.

Z toho plyne, že modul pružnosti betonu může být vyjádřen prostřednictvím modulu pružnosti kameniva a pevnosti betonu v tlaku, to znázorňuje následující obrázek [8]:

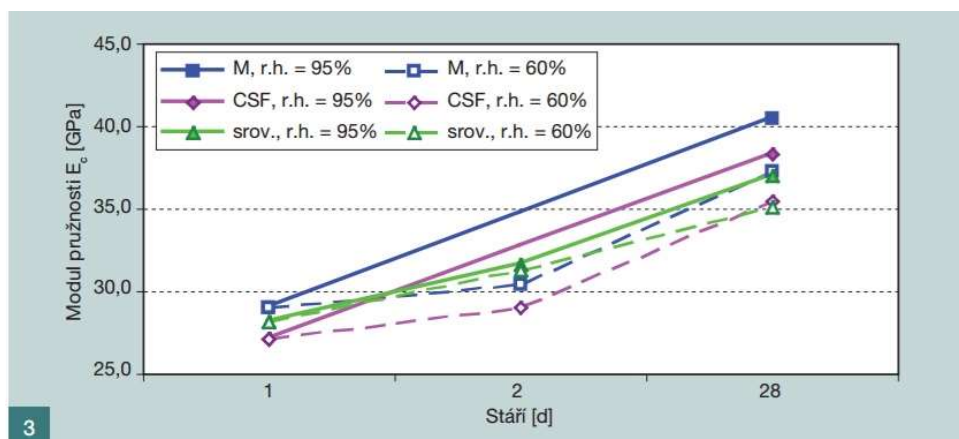


Obrázek 12. Předpovězené hodnoty modulu pružnosti betonu v závislosti na hodnotách modulu pružnosti hrubého kameniva a na hodnotách pevnosti betonu v tlaku [8]

3.3.1.2 Vliv příměsí

V současnosti se pro různé betonové konstrukce používají různé typy příměsí – to je opodstatněno koncepcí trvale udržitelného rozvoje, tedy snížení používání portlandského cementu na minimální možnou úroveň. Vedle pevnosti betonu v tlaku se tak v pozornosti ocitají i další vlastnosti betonu, jako je trvanlivost a modul pružnosti betonu [27].

Cíkrle P. a Blažek V. ve svém experimentu porovnávali vliv metakaolinu (*M*) a mikrosilika (*CSF*) na modul pružnosti betonu. Z výsledků jejich experimentu byl patrný vliv metakaolinu na zvýšený modul pružnosti. Porovnané výsledky jsou zobrazeny v následujícím obrázku [27]:



Obrázek 13. Porovnání hodnot modulů pružnosti s příměsí [27]

Beton s příměsí metakaolinu (*M*), mikrosiliky (*CSF*) a bez příměsí (*srov.*). Dále však uvádějí, že tyto zvýšené hodnoty nikterak nevybočují z trendu zvyšující se pevnosti betonu v tlaku a zvýšené hodnoty modulu pružnosti jsou důsledkem zvýšené tlakové pevnosti. Vliv příměsí je tedy poněkud diskutabilní [27].

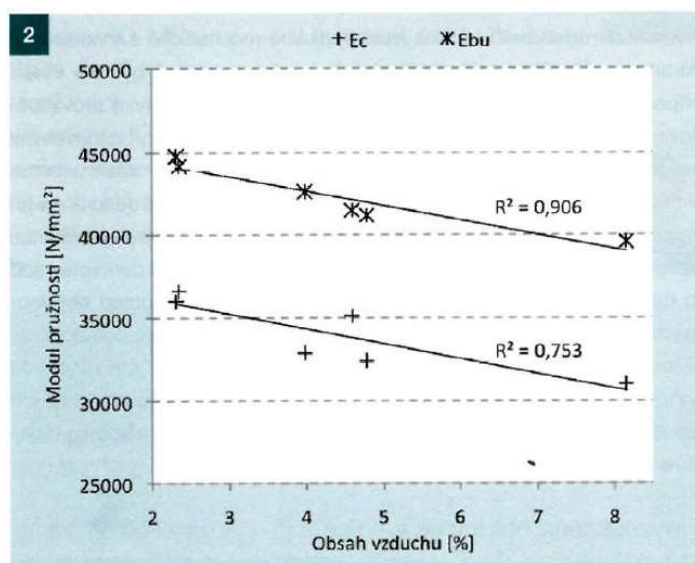
Použitím různých příměsí lze výrazně zlepšit vlastnosti, ale přináší to sebou i negativa. Roste obsah cementové pasty, to má za následek snížení obsahu kameniva v betonu, které má na modul pružnosti největší vliv [27].

3.3.1.3 Vliv pórovitosti betonu

Beton, který se v dnešní době používá ve stavebnictví, je pórovitý materiál a obsahuje několik typů pórů. Jeho pórovitost zásadně ovlivňuje vlastnosti betonu, především pevnost, modul pružnosti, permeabilitu a mrazuvzdornost betonu [25].

Póry nebo kaverny, které vznikly nedokonalým hutněním čerstvé betonové směsi, mají nepravidelný tvar a v nedokonale ztuhnutém betonu jsou zastoupeny ve velkém počtu. To má negativní vliv na jeho vlastnosti [25].

V provzdušněných betonech se během míšení betonové směsi vytváří ve velkém počtu uzavřené vzduchové póry jemně distribuované. Průměr těchto pórů je v rozmezí od 25 do 300 μm . Tyto póry mění pórovitou strukturu cementového kamene a porušují síť kapilár. Výsledkem je že tyto typy betonu mají zvýšenou odolnost mrazuvzdornosti [4]. Autoři článku [28] při zkoumání vlivu obsahu vzduchu na materiálové charakteristiky zjistili, že se zvyšujícím se obsahem vzduchu ve ztuhlém betonu klesá statický i dynamický modul pružnosti betonu [28].



Obrázek 14. Znázornění závislosti statického E_c a dynamického E_{bu} modulu pružnosti na obsahu vzduchu [28]

V případě pórovitých kameniv, která se používají především pro zlepšení tepelně a akusticky izolačních vlastností, jsou póry přítomné v samotném zrně kameniva. Snížení mechanických vlastností kameniva vede i ke snížení mechanických vlastností betonu [25].

Při hydrataci cementu dochází ke vzniku kapilárních pórů, jejichž velikost je od 0,1 do 10 μm . Kapilární póry mají nepravidelný tvar a jejich množství významně závisí na množství záměsové vody, tedy vodním součiniteli w/c a dále na způsobu ošetřování betonu a stupni hydratace. Zvýšený w/c vede k většímu množství kapilárních pórů, čímž narůstá pórovitost betonu. To má vliv na pevnost a modul pružnosti [25].

Pórovitost cementové pasty velmi ovlivňuje modul pružnosti cementového kamene, tudíž i modul pružnosti betonu. Při uvažování kapilární pórovitosti cementové pasty platí vztah [3]:

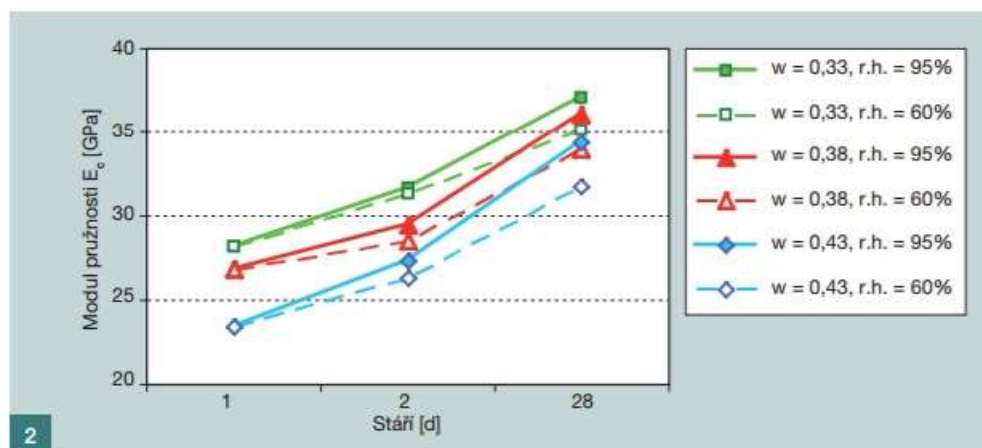
$$E_p = E_g \cdot (1 - P_c)^3 \quad (12)$$

kde E_p je modul pružnosti ztvrdlé cementové pasty v GPa, E_g je modul pružnosti ztvrdlé cementové pasty při nulové pórovitosti v GPa a P_c je celková pórovitost cementového kamene [3].

3.3.1.4 Vliv vodního součinitele a ošetřování betonu

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.3.1.3, s vyšším vodním součinitelem dochází ke vzniku kapilárních pórů, které mají za následek snížení modulu pružnosti betonu [25].

Cíkrle P. a Bílek V. porovnávali vliv vodního součinitele a způsobu ošetřování na modul pružnosti betonu, jejich výsledky jsou uvedeny v následujícím obrázku [27]:



Obrázek 15. Vliv vodního součinitele a ošetřovacích podmínek na modul pružnosti betonu [27]

Všechny směsi ponechané 28 dní ve vlhkém uložení (r.h. = 95 %), vykazují vyšší hodnoty modulu pružnosti než beton zrající na vzduchu v laboratorním prostředí (r.h. = 60 %) [27].

Vodní součinitel určuje pevnost betonu a tím do jisté míry i modul pružnosti. Jeho nízká hodnota se pozitivně projeví na hodnotách modulu pružnosti především v prvních dnech zrání [27].

Vhodné ošetřování má na vlastnosti betonů významný vliv. Nedostatečné ošetřování má za následek vznik mikrotrhlin, které mají výrazný dopad na snížení trvanlivosti betonu. Mikrotrhliny by měly mít i výrazný vliv na modul pružnosti betonu [27].

3.3.1.5 Vliv plastifikačních a superplastifikačních přísad

Plastifikační přísady snižují potřebné množství vody při dosažení stejné zpracovatelnosti betonu. Superplastifikační přísady redukují potřebné množství vody ještě dokonaleji [4]. Získáme tak beton s dobrou zpracovatelností a dobrým předpokladem pro vyšší modul pružnosti.

Díky redukci záměsové vody dochází ke snížení hodnoty vodního součinitele w/c a tím ke snížení počtu kapilárních pórů a zvýšení hutnosti cementového tmele.

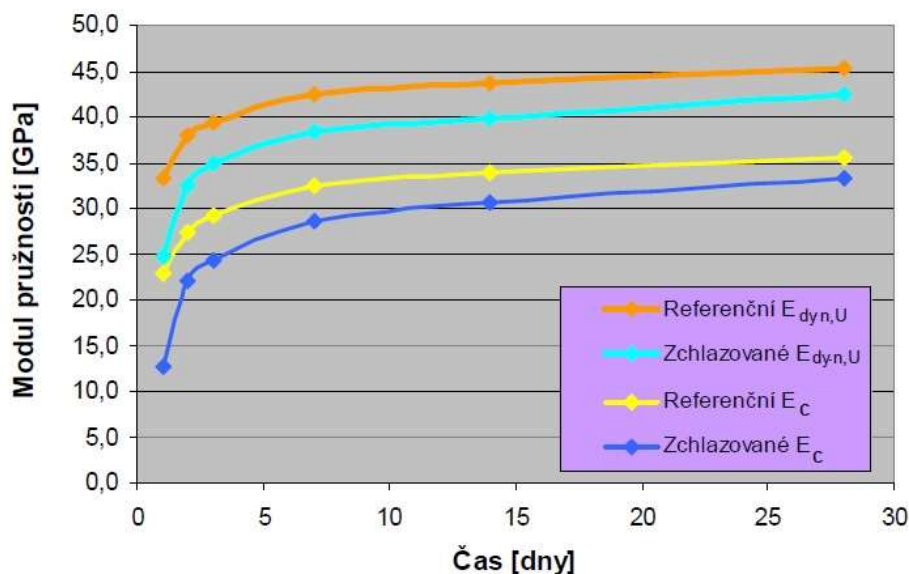
Při použití lignosulfonanů může docházet k napěnění, a tudíž ke zvýšení pórovitosti cementového kamene, což může vést ke snížení hodnot modulu pružnosti. Často se lignosulfonany používají v kombinaci s polykarboxyláty, které nepříznivý vzduch ze struktury betonu odvádějí. Výsledkem pak je dobré ztekucení a dostatečná hutnost cementového kamene.

Použití polykarboxylátů je závislé na jeho typu, některé jeho modifikace mohou odvádět ze struktury betonu vzduch, což může mít pozitivní účinek jak na pevnost, tak na modul pružnosti betonu.

3.3.1.6 Vliv teploty

Blažek M. při svém experimentu v bakalářské práci zjišťoval vliv teploty na modul pružnosti betonu při ošetřování zkušebních těles. Ve své práci dospěl k závěru, že vliv teploty je nejvíce patrný v počátečních dnech zrání [29].

Vývoj statických a dynamických modulů pružnosti betonu v čase je znázorněn v následujícím obrázku [29]:



Obrázek 16. Vývoj statického E_c a dynamického $E_{dyn,U}$ modulu pružnosti betonu v čase [29]

Referenční zkušební tělesa byla ošetřována při laboratorní teplotě a zchlazovaná zkušební tělesa byla ošetřována při teplotě 10 °C. Z obrázku lze zřetelně určit, že po prvním dni byl statický modul pružnosti zchlazovaného zkušební tělesa zhruba o polovinu nižší než u tělesa referenčního. S postupem času se tento rozdíl snižuje a není příliš významný [29].

3.3.2 Zkušební vlivy

3.3.2.1 Způsob získání zkušební tělesa

Pro stanovení modulu pružnosti dle ČSN ISO 1920-10 [20] je možné získat zkušební tělesa dle ČSN EN 12350-1 [30] nebo ČSN EN 12390-2 [31]. Stanovení modulu pružnosti betonu v konstrukci při odběru válců 150 × 300 mm, popř. trámů 100 × 100 × 400 mm většinou není možné. Norma ČSN ISO 1920-10 [20] stanovuje nejmenší rozměr vzorku 100 mm a nejméně trojnásobek nominální největší velikosti zrn kameniva v betonu podle toho, která z hodnot je vyšší [2].

Existuje mnoho faktorů, které ovlivňují statický modul pružnosti betonu na vývrtu odebraného z konstrukce. Vedle zkušebních vzorků připravených do forem, uložených do vodního nebo laboratorního prostředí a technologickým vlivům, jako je rozdílný způsob zpracování a zrání betonu v konstrukci, jsou i další vlivy [2].

Je to samotná volba místa, kterou ovlivňuje [2]:

- vyztužení konstrukce,
- ovlivnění statického působení,
- estetika,
- technická náročnost odběrů vzorků,
- odlišné zrání betonu v různých místech konstrukce.

Dále z pohledu tvaru, rozměrů a kvality vzorků [2]:

- průměr vývrtu,
- štíhlost vývrtu,
- poměr průměru vývrtu / maximálního zrna kameniva,
- otevřený povrch vzorku.

Všechny výše uvedené vlivy je nutné vzít v úvahu při stanovení modulu pružnosti na tělesech odebraných z konstrukce. Momentálně literatura nenabízí souhrnné informace o vlivu vývrtů na modul pružnosti betonu. Vlivem výše uvedených důsledků jsou obvykle hodnoty modulu pružnosti naměřené na vzorcích odebraných z konstrukce nižší než hodnoty zjištěné na laboratorních zkušebních tělesech [2].

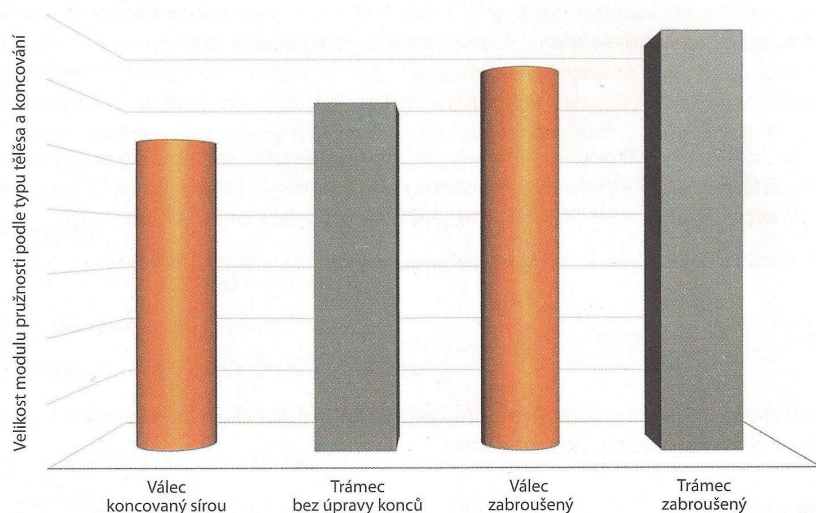
3.3.2.2 Způsob zakončování tlačných ploch

Normy ČSN EN 12390-1 [31] a ČSN EN 12390-2 [32] popisují požadavky na kvalitu tlačných ploch. Při výrobě válců jako zkušebních těles jsou požadavky na rovinnost a rovnoběžnost nesplněny. Stejně jako další zkušební tělesa, která tyto požadavky nesplňují dle uvedených norem [31] a [32], musí být konce tělesa opatřeny následujícím způsobem [2]:

- broušením,
- sirnou nebo cementovou maltou.

Tloušťka malty má být maximálně 5 mm. Zkušební vzorky musí být mimo vodní prostředí po co nejkratší dobu. Stáří zkušebních vzorků by mělo být minimálně 7 dní a 12 hodin před samotnou zkouškou by měly být vráceny do vody nebo vlhkého prostředí ($\phi \geq 95 \%$) [2].

V publikaci Technická pravidla ČBS 05 je uvedeno [2]: „Z dlouhodobých laboratorních zkoušek jsou zřejmé systematicky nižší hodnoty modulů pružnosti naměřené na válcích zakončovaných sirnou maltou oproti válcům broušeným. Trámce jsou obvykle bez koncových úprav. V případě jejich zabroušení výsledky zkoušek vykazují nejvyšší hodnoty“. Toto porovnání je uvedeno v následujícím obrázku:



Obrázek 17. Srovnání betonu jedné pevnostní třídy na zkušebních tělesech různého tvaru a typu zakončení [2]

4 PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE

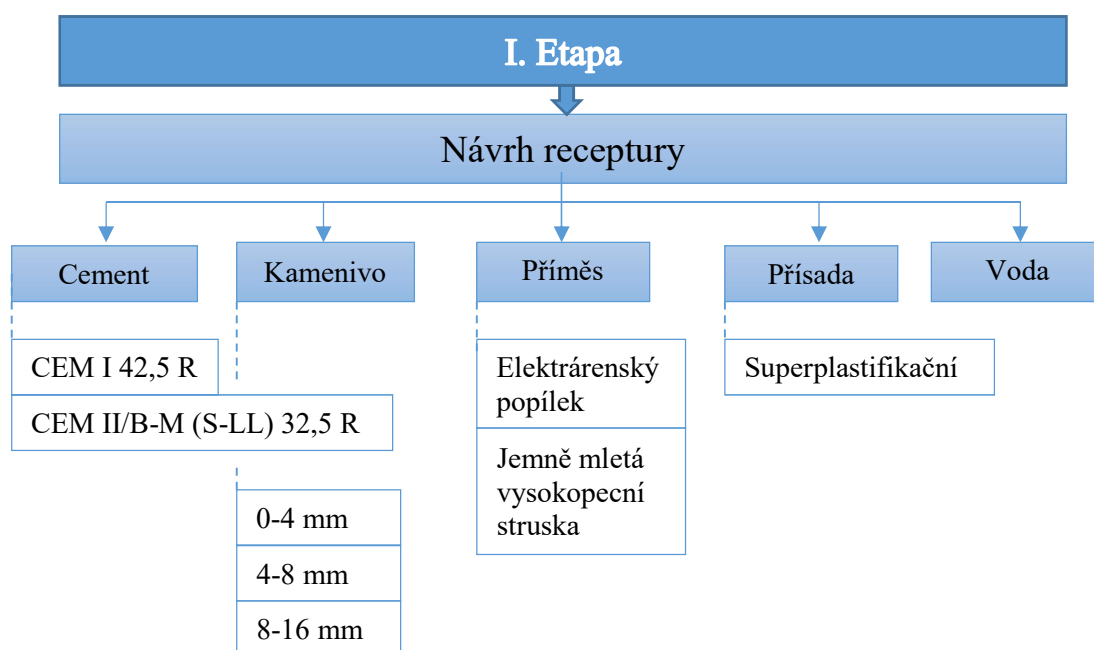
4.1 Metodika práce

Praktická část práce byla rozdělena do čtyř základních etap podle návaznosti jednotlivých pracovních postupů.

1. Etapa

V první etapě byly především určeny vstupní suroviny, které budou použity do čtyř receptur.

Byly použity dva typy cementů, u prvních třech receptur to byl portlandský cement CEM I 42,5 R a v případě čtvrté receptury portlandský směsný cement s vysokopecní struskou a vápencem CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R. Pro všechny čtyři receptury byly použity tři stejné frakce kameniva. Jednalo se o drobné těžené kamenivo frakce 0-4 mm, hrubé drcené kamenivo frakce 4-8 mm a 8-16 mm. Za účelem snížení množství dávky cementu byly použity dva typy příměsí. Pro druhou a čtvrtou recepturu byl zvolen elektrárenský popílek z Chvaletic. Ve třetí receptuře byla jako příměs použita jemně mletá vysokopecní struska. Superplastifikační přísada, která snižuje množství záměsové vody, byla Sika ViscoCrete-1035 CZ. Poslední použitou složkou byla voda, jednalo se o běžnou z vodovodního řádu.



Obrázek 18. Znázornění postupu návrhu receptury

4.1.1 Výpis použitých suroviny

▪ Cement

CEM I 42,5 R

- portlandský cement
- betony běžných a vyšších pevnostních tříd, s rychlým nárůstem pevností, předpínané betony, suché omítkové směsi a malty, betonové zboží
- portlandský slínek 95-100 %
- měrný povrch $381 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, hydratační teplo $310 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, počátek tuhnutí 201 minut, konec tuhnutí 264 minut
- Českomoravský cement, a.s., závod Mokrá

CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

- portlandský směsný cement s vysokopecní struskou a vápencem
- betony středních pevnostních tříd, se středním nárůstem pevností, prosté a vyztužené betony, průmyslové stavby, betonové výrobky
- portlandský slínek 65-79 %, vysokopecní struska a vápenec 21-35 %
- měrný povrch $529 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, hydratační teplo $290 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, počátek tuhnutí 195 minut, konec tuhnutí 250 minut
- Českomoravský cement, a.s., závod Mokrá

▪ Kamenivo

Frakce 0-4 mm

- drobné těžené kamenivo kopané
- Písek Žabčic spol. s.r.o., pískovna Žabčice

Frakce 4-8 mm

- hrubé drcené kamenivo
- vyvřelá hornina granodiorit
- Českomoravský štěrk, a.s., kamenolom Olbramovice

Frakce 8-16 mm

- hrubé drcené kamenivo
- vyvřelá hornina granodiorit
- Českomoravský štěrk, a.s., kamenolom Olbramovice

▪ **Příměs**

Elektrárenský popílek

- z vysokoteplotního spalování černého uhlí
- ČEZ Energetické produkty s.r.o., elektrárna Chvaletice

Jemně mletá vysokopecní struska

- ČEZ Energetické produkty s.r.o., elektrárna Dětmarovice

▪ **Superplastifikační přísada**

Sika ViscoCrete 1035 CZ

- vodný roztok modifikovaných polykarboxylátů
- použití pro transportbetony, samozhutnitelné betony, vysoce pevnostní a hutné betony
- dávkování 0,2 až 1,7 % na hmotnost cementu, objemová hmotnost $1,06 \text{ kg} \cdot \text{l}^{-1}$
- Sika CZ, s.r.o

▪ **Voda**

- použita běžná z vodovodního řádu

4.1.2 Přehled navržených receptur

Složení všech čtyř receptur je uvedeno v následující tabulce. Receptury **REC I** až **REC III** obsahovaly stejný druh cementu CEM I 42,5 R, pouze receptura **REC IV** obsahuje druh cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R. Receptura **REC I** neobsahovala žádný typ příměsi, v receptuře **REC II** a **REC IV** byla část cementu nahrazena elektrárenským popílkem z Chvaletic, v prvním případě v množství $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (18,5 % náhrady cementu) a ve druhém v množství $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (13,5 % náhrady cementu). V receptuře **REC III** byla část cementu nahrazena jemně mletou vysokopecní struskou v množství $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (18,5 % náhrady cementu).

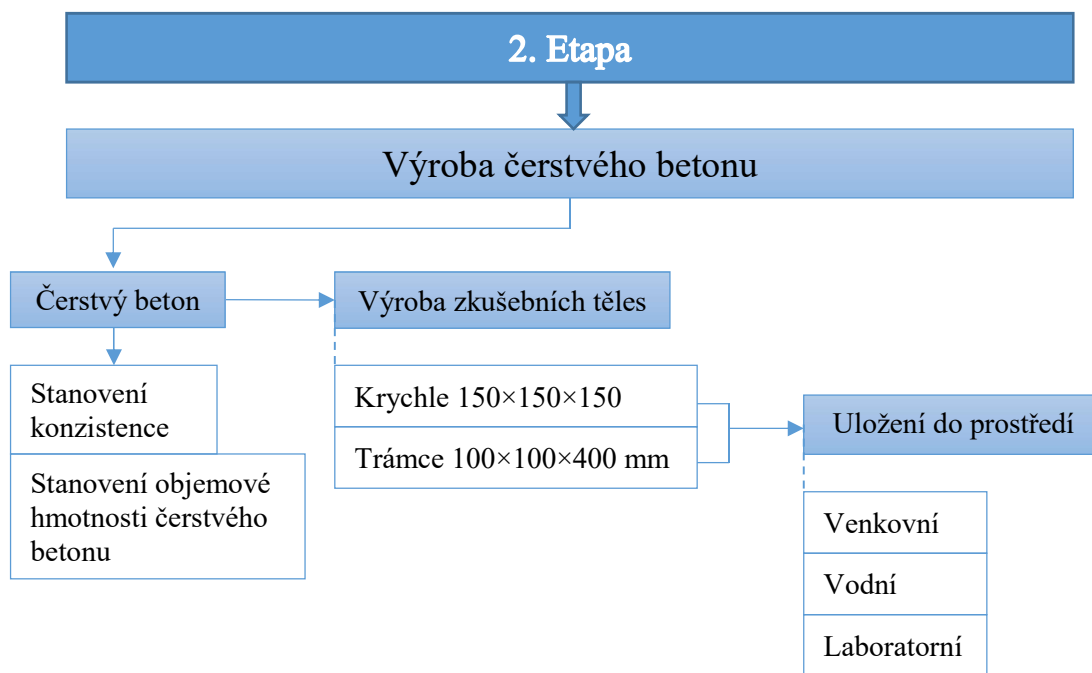
Tabulka 3. Složení navržených receptur na 1 m³ betonu

Označení		REC I	REC II	REC III	REC IV
Cement CEM I 42,5 R		360	324	324	-
Cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R		-	-	-	371
Elektrárenský popílek		-	60	-	50
Vysokopecní struska		-	-	60	-
Kamenivo	DTK 0-4 mm	897	899	899	1006
	HDK 4-8 mm	371	372	372	437
	HDK 8-16 mm	525	527	527	619
Voda		144	143	146	152
Superplastifikační přísada v [%]		0,9	0,9	0,9	0,9
Superplastifikační přísada v [kg]		3,24	2,92	2,92	3,30
Vodní součinitel		0,40	0,44	0,45	0,42

Ve všech čtyřech typech receptur byla shodná skladba frakcí kameniv. Pro snížení množství záměsové vody byla použita superplastifikační přísada Sika ViscoCrete 1035 CZ v množství 0,9 % z hmotnosti cementu u všech čtyřech receptur. Množství záměsové vody bylo korigováno, tak aby bylo dosaženo stejné konzistence u všech receptur. Vodní součinitel u receptury **REC I** byl stanoven ze vztahu w/c , tedy množství záměsové vody ku množství cementu a měl hodnotu $w/c=0,40$. U receptur, kde byla použita příměs elektrárenský popílek nebo vysokopecní struska, musela být hodnota vodního součinitele zohledněna k -hodnotou. Norma ČSN EN 206 [23] udává k -hodnotu pro popílek $k=0,4$ a pro strusku $k=0,6$. Vodní součinitel u receptury **REC II** měl hodnotu $w/c=0,44$, u receptury **REC III** $w/c=0,45$ a u receptury **REC IV** $w/c=0,42$.

2. Etapa

Ve druhé etapě se odehrálo namíchání navržených receptur, stanovení konzistence čerstvého betonu, výroba zkušebních těles, stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu a následné uložení zkušebních těles do požadovaného prostředí.



Obrázek 19. Znázornění postupu výroby čerstvého betonu a výroby zkušebních těles

Po namíchání navržené receptury byla stanovena konzistence čerstvého betonu metodou sednutí kužele. Následovalo uložení a zhutnění čerstvého betonu ve zkušebních formách. Pro stanovení následných zkoušek bylo třeba vyrobít zkušební tělesa ve tvaru krychle o rozměrech 150×150×150 mm a trámce o rozměrech 100×100×400 mm.

Po naplnění zkušebních forem a zhutnění čerstvého betonu následovalo stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu.

Po odformování zkušebních těles následovalo uložení do určeného prostředí ke zrání. Každá receptura byla rozdělena na tři sady, které se lišily způsobem uložení zkušebních těles. První sada zkušebních těles byla uložena ve venkovním prostředí, měla tedy přirozené podmínky ke zrání. Druhá sada obsahoval zkušební tělesa, která byla uložena do vodního prostředí a třetí sada zkušebních těles byla uložena v laboratorním prostředí.

4.1.3 Stanovení konzistence čerstvého betonu

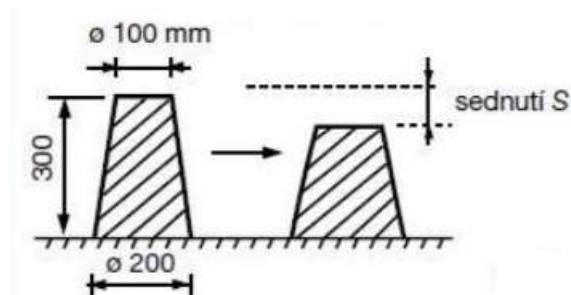
Postup při stanovení konzistence čerstvého betonu se prováděl dle normy ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím [33].

Forma pro vytváření zkušebního tělesa (Abramsův kužel) a podložka se nejprve navlhčila a forma se položila na vodorovnou podkladní desku. Během plnění byla forma přišlápnuta k podkladní desce a plnila se ve třech vrstvách. Každá vrstva se zhutňovala 25 vpichy

propichovací tyčí, rovnoměrně přes průřez. Druhá a třetí vrstva se hutnila přes celou výšku vrstvy tak, aby vpichy mírně zasahovali do předešlé vrstvy. Po zhutnění třetí vrstvy se odstranil přebytečný beton. Po plynulém zvednutí formy se zaznamenalo sednutí h s přesností na 10 mm [33].

Tabulka 4. Zatřídění sednutí kužele [33]

Stupeň sednutí	Sednutí [mm]
S1	10–40
S2	50–90
S3	100–150
S4	160–210
S5	≥ 220



Obrázek 20. Rozměry formy a stanovení sednutí kužele [34]

4.1.4 Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu

Postup stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu probíhal dle laboratorní metody odvíjející se ze zjišťování hmotnosti forem.

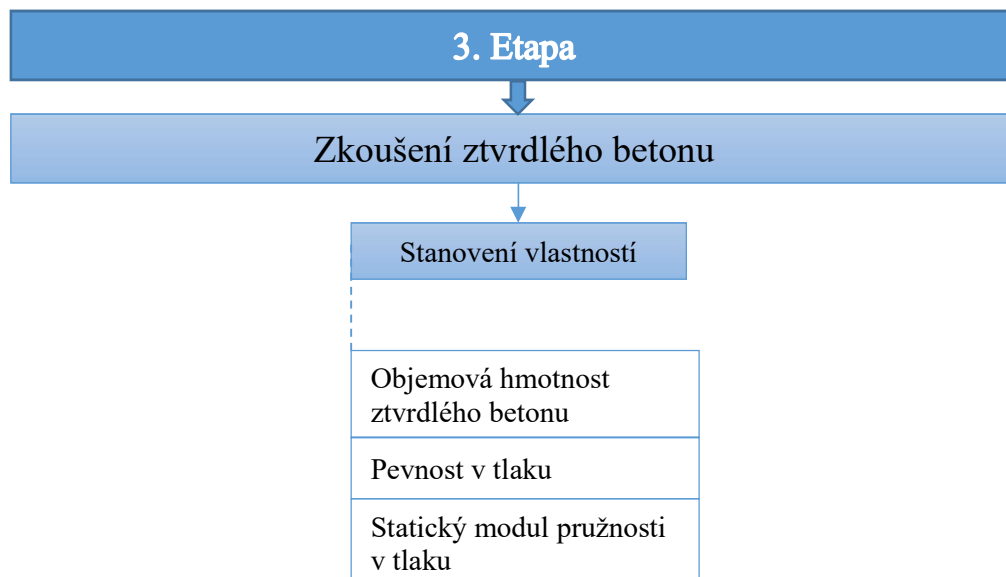
Nejprve byla zjištěna hmotnost zkušební formy m_1 , poté byla zkušební forma naplněna čerstvým betonem a po zhutnění byla zaznamenána hmotnost zkušební formy s čerstvým betonem m_2 . Objemová hmotnost čerstvého betonu se pak vypočítá ze vztahu:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (13)$$

kde m_2 je hmotnost formy s čerstvým betonem, m_1 je hmotnost prázdné formy a V je stanovený objem formy. Objemová hmotnost čerstvého betonu se zaokrouhlí na nejbližších $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

3. Etapa

Třetí etapa se skládala ze zkoušek na zkušebních tělesech, která se po odformování uložila do daného prostředí. Zkušební tělesa byla v tomto prostředí uložena po celou dobu, až do doby stanovení vlastností ztvrdlého betonu. Zkoušky se prováděly na zkušebních tělesech po 7 a 28 dnech.



Obrázek 21. Znázornění postupu prováděných zkoušek na ztvrdlém betonu

Z naměřených rozměrů a zjištěné hmotnosti zkušebních tělese, byla nejprve stanovena objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Na krychlích byla stanovena pevnost v tlaku, trámce sloužili ke stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku a ke kontrolnímu srovnání pevnosti v tlaku.

4.1.5 Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

Postup stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu se prováděl dle normy ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu [35]. Objem zkušebního tělesa V se získal z měřených skutečných rozměrů, hmotnost m byla získána zvážením zkušebního tělesa. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu se stanovila ze vztahu [35]:

$$D = \frac{m}{V} \quad (14)$$

kde m je hmotnost zkušebního tělesa a V stanovený objem tělesa z jeho rozměrů. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu se zaokrouhlí na nejbližších $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [35].

4.1.6 Stanovení pevnosti v tlaku zkušebních těles

Postup stanovení pevnosti v tlaku zkušebních těles vycházel z normy ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles [36].

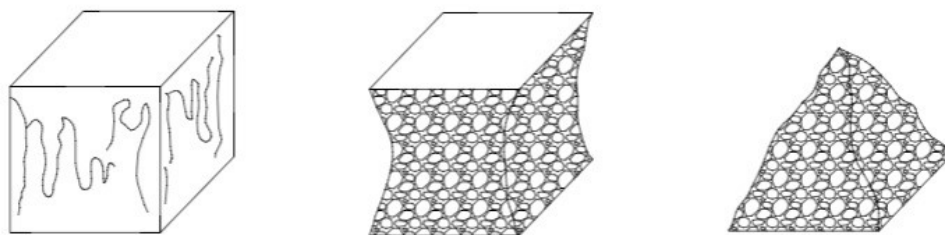
Nejprve se stanovili se rozměry zkušebního tělesa s přesností na 0,1 mm. Ze stanovených rozměrů se určila zatěžovací plocha zkušebního tělesa A_c . Zkušební těleso se zatěžovalo rovnoměrnou rychlostí až do jeho porušení, kdy se odečetlo maximální zatížení F při porušení. Při stanovení pevnosti v tlaku na hranolech

Pevnost zkušebního tělesa v tlaku se stanovila ze vztahu [36]:

$$f_{c,cube} = \frac{F}{A_c} \quad (15)$$

kde F je maximální zatížení zkušebního tělesa při porušení a A_c je průřezová plocha. Pevnost v tlaku se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa [36].

Při stanovení pevnosti v tlaku na trámcích musela být výsledná hodnota upravena koeficientem 0,85.



Obrázek 22. Vyhovující porušení krychlí [36]

4.1.7 Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku

Postup stanovení statického modulu pružnosti v tlaku se prováděl dle normy ČSN ISO 1920-10. Zkoušení betonu-Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku [20]. Podrobně je uveden v kapitole 3.2.5. Při použití jiných zkušebních těles (krychlí) pro stanovení srovnávací pevnosti betonu v tlaku musí být hodnota přepočítána dle přepočtového vztahu:

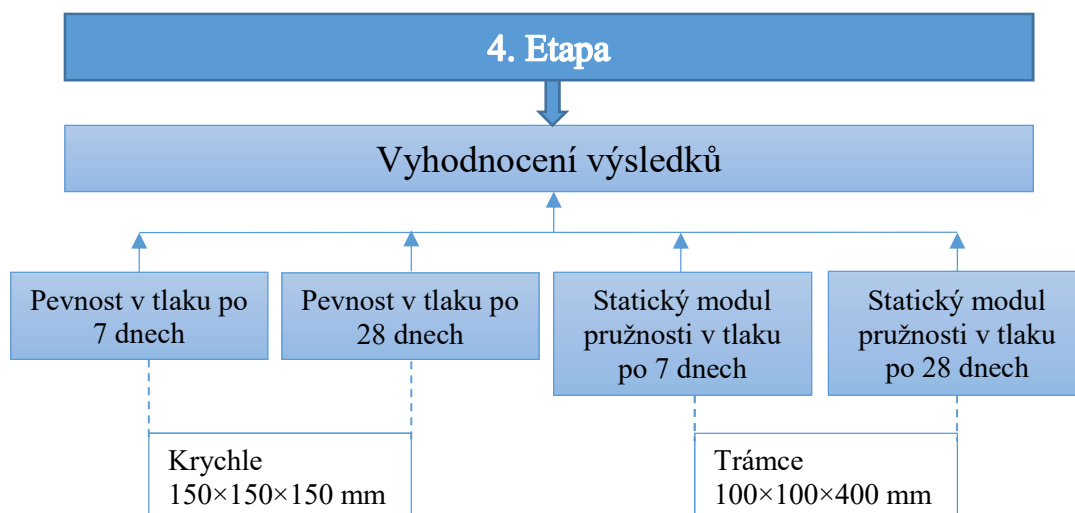
$$f_{c,beam} = 0,85 \cdot f_{c,cube} \quad (16)$$



Obrázek 23. Osazení zkušebního hranolu měřícím zařízením

4. Etapa

Poslední čtvrtá etapa se věnovala vyhodnocení získaných hodnot při zkoušení ztvrdlého betonu. Nejprve došlo k porovnání získaných výsledků při stanovení pevnosti betonu v tlaku a statických modulů pružnosti betonu v tlaku u jednotlivých receptur v závislosti na uložení zkušebních těles. Nakonec došlo ke shrnutí všech získaných výsledků u všech čtyř receptur. Byly sledovány i výsledky pevností v tlaku a statických modulů pružnosti v závislosti na čase, konkrétně po 7 a 28 dnech.



Obrázek 24. Znázornění vyhodnocení prováděných zkoušek

4.2 Diskuze výsledků

V následujících kapitolách budou uvedeny jednotlivé výsledky zkoušek prováděných na čerstvém nebo ztvrdlém betonu u všech navržených receptur.

4.2.1 Sledované vlastnosti čerstvého betonu

Zkouška konzistence čerstvého betonu byla stanovena metodou sednutí kužele a pohybovala se v rozmezí od 100 do 110 mm, což se řadí do stupně sednutí S3. Objemová hmotnost čerstvého betonu byla stanovena již podle uvedeného vzorce a jednotlivé betony měli téměř identické hodnoty, ty se pohybovaly v rozmezí od $2270 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ do $2290 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Získané hodnoty čerstvého betonu jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 5. Vlastnosti čerstvého betonu receptury všech receptur

Označení	REC I	REC II	REC III	REC IV
Sednutí kužele [mm]	110	100	100	110
Stupeň sednutí [-]	S3	S3	S3	S3
Objemová hmotnost ČB [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2270	2270	2290	2290
Vodní součinitel [-]	0,40	0,44	0,45	0,42

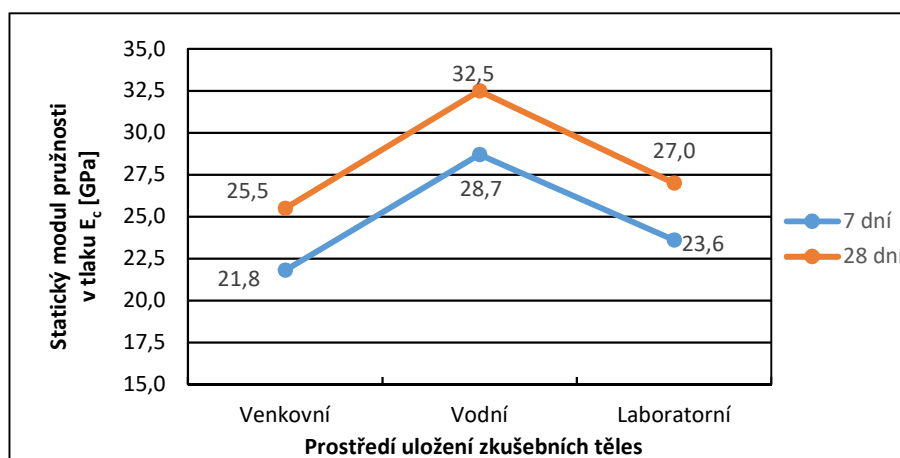
4.2.2 Sledované vlastnosti ztvrdlého betonu

U první receptury **REC I** se objemová hmotnost ztvrdlého betonu pohybovala v rozmezí od $2270 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ do $2350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Rozdíl pevností v tlaku po 7 dnech byl jen 3,2 MPa, nevyšší hodnota byla dosažena ve vodním prostředí 44,0 MPa, nejnižší pak ve venkovním prostředí 40,8 MPa. Pevnost v tlaku po 28 dnech byla nejvyšší opět u sady těles uložených ve vodním prostředí činila 49,5 MPa, nejnižší hodnota pevnosti v tlaku byla zaznamenána u sady těles uložených v laboratorním prostředí, ta činila 42,2 MPa. Rozdíl pevností v tlaku těles uložených ve vodním a venkovním prostředí byl pouze 1,5 MPa.

Tabulka 6. Vlastnosti ztvrdlého betonu receptury REC I

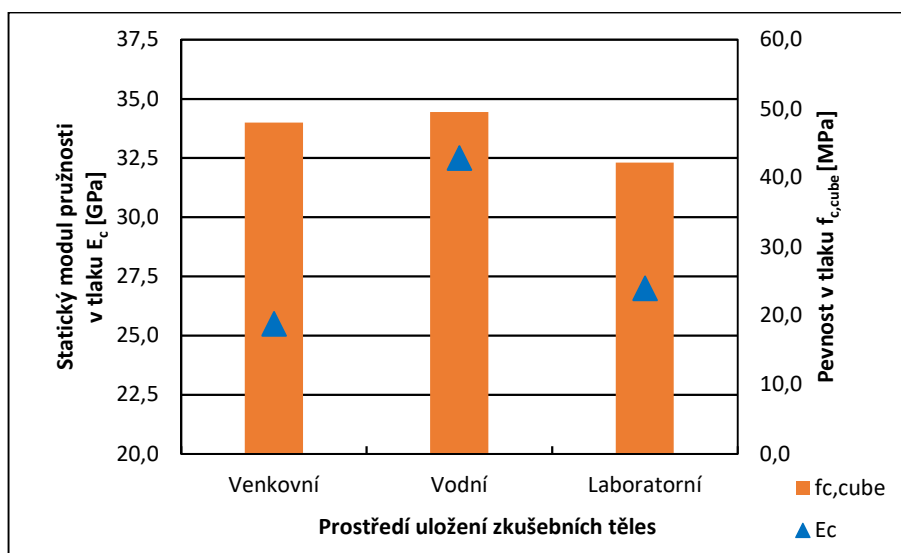
Označení receptury		REC I		
Prostředí uložení		Venkovní	Vodní	Laboratorní
Objemová hmotnost ZB D [kg·m ⁻³]	7 dní	2340	2350	2280
	28 dní	2320	2330	2270
Pevnost v tlaku $f_{c,cube}$ [MPa]	7 dní	40,8	44,0	41,7
	28 dní	48,0	49,5	42,2
Hranolová pevnost v tlaku $f_{c,beam}$ [MPa]	28 dní	35,5	40,5	35,8
Statický modul pružnosti v tlaku E_c [GPa]	7 dní	21,3	28,7	23,3
		22,3	28,6	23,8
	průměr	21,8	28,7	23,6
	28 dní	26,2	32,5	26,7
		24,8	32,4	27,2
	průměr	25,5	32,5	27,0

V následujícím grafu můžeme sledovat vývoj modulů pružnosti v čase u receptury REC I. Nejvyšších hodnot dosahuje sada zkušebních těles, která byla uložena ve vodním prostředí, a to jak po 7 tak i po 28 dnech. Nejnižších hodnot pak dosahuje sada zkušebních těles uložených ve venkovním prostředí, kde nebyla tělesa žádným způsobem ošetřována, ale byla vystavena klimatickým podmínkám v daném období. Rozdíl modulu pružnosti po 7 dnech činí 7,0 GPa, po 28 dnech potom 6,9 GPa.



Graf 1. Srovnání hodnot statického modulu pružnosti v tlaku

Graf 2. zobrazuje závislost pevnosti v tlaku na modulu pružnosti betonu po 28 dnech. Přestože zkušební tělesa uložená v laboratorním prostředí dosahují o 5,8 MPa nižší pevnosti v tlaku než zkušební tělesa ve venkovním prostředí, tak statický modul pružnosti je vyšší u těles uložených v laboratorním prostředí. Nejvyšších hodnot jak pevnosti v tlak, tak statického modulu pružnosti dosahují tělesa uložená ve vodním prostředí.



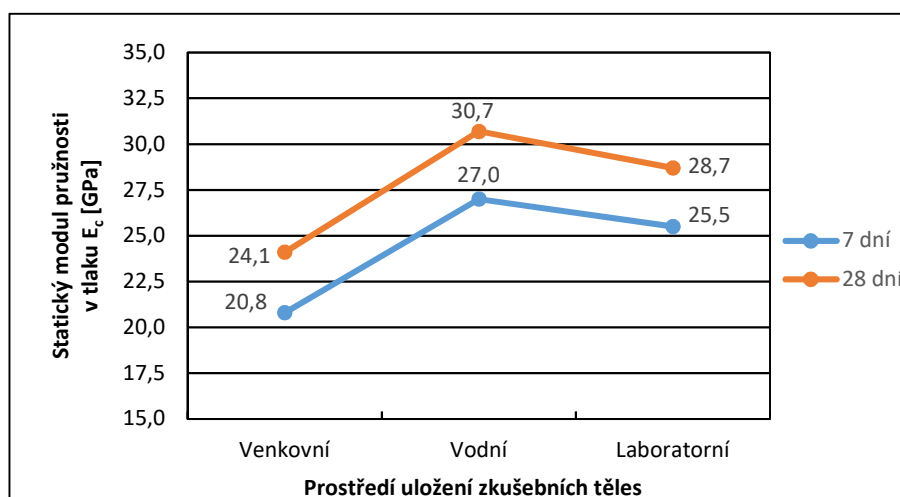
Graf 2. Zobrazení závislosti pevnosti v tlaku na modulu pružnosti v tlaku po 28 dnech

Ve druhé receptuře **REC II** byla část cementu nahrazena příměsí konkrétně elektrárenským popílkem z Chvaletic. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu se pohybovala v rozmezí od $2290 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ do $2330 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Rozdíl pevností v tlaku po 7 dnech je 9,1 MPa. Nejvyšší hodnota byla dosažena u zkušebních těles uložených ve vodním prostředí, činila 43,2 MPa, nejnižší pak u zkušebních těles uložených ve venkovním prostředí, činila 34,1 MPa. Rozdíl pevnosti v tlaku po 28 dnech se mírně zmenšil na 8,3 MPa. Můžeme pozorovat že hodnoty pevnosti v tlaku u zkušebních těles uložených ve vodním a laboratorním prostředí jsou téměř identické. Opět nejnižší hodnotu pevnosti v tlaku mají tělesa uložená ve venkovním prostředí, ta činí 40,0 MPa.

Tabulka 7. Vlastnosti ztvrdlého betonu receptury REC II

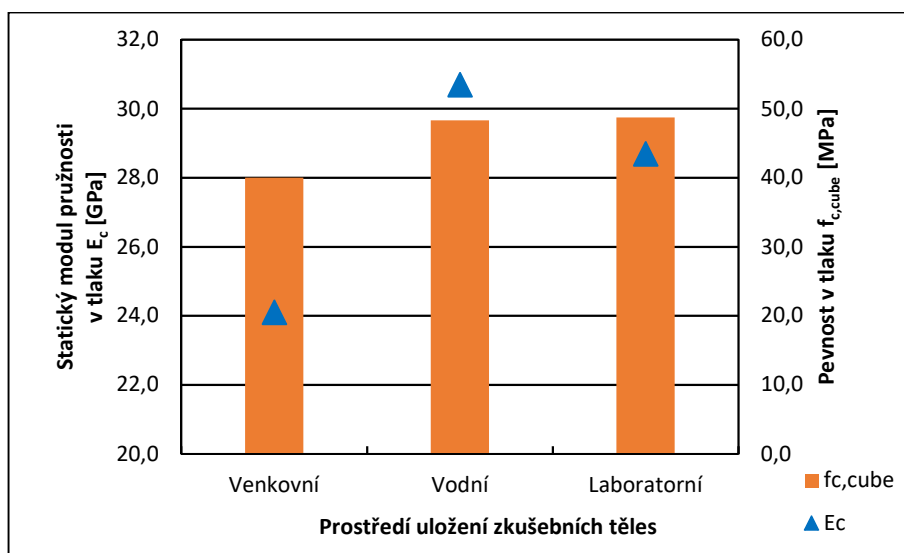
Označení receptury		REC II		
Prostředí uložení		Venkovní	Vodní	Laboratorní
Objemová hmotnost ZB D [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	7 dní	2310	2320	2310
	28 dní	2290	2330	2290
Pevnost v tlaku f_c [MPa]	7 dní	34,1	43,2	40,7
	28 dní	40,0	48,3	48,7
Hranolová pevnost v tlaku $f_{c,beam}$ [MPa]	28 dní	30,8	47,0	40,4
Statický modul pružnosti v tlaku E_c [GPa]	7 dní	20,3	26,2	25,5
		21,2	27,7	25,5
	průměr	20,8	27,0	25,5
	28 dní	24,4	31,5	29,0
		23,7	29,8	28,4
	průměr	24,1	30,7	28,7

Po 7 i 28 dnech dosahuje díl těles uložených ve vodním prostředí největších hodnot. Ve stáří 7 dní činí rozdíl sledovaných hodnot 6,2 GPa, po 28 dnech tento rozdíl ještě mírně narostl na 6,6 GPa, to znázorňuje *graf 3*.



Graf 3. Srovnání hodnot statického modulu pružnosti v tlaku

Graf 4. zobrazuje závislost pevnosti v tlaku na modulu pružnosti betonu v tlaku po 28 dnech. Pevnost v tlaku zkušebních těles v laboratorním prostředí je nepatrně vyšší než zkušebních těles uložených ve vodním prostředí, rozdíl statických modulů pružnosti činí 2,0 GPa. Rozdíl statických modulů pružnosti v tlaku zkušebních těles uložených ve vodním a venkovním prostředí činí 6,6 GPa.



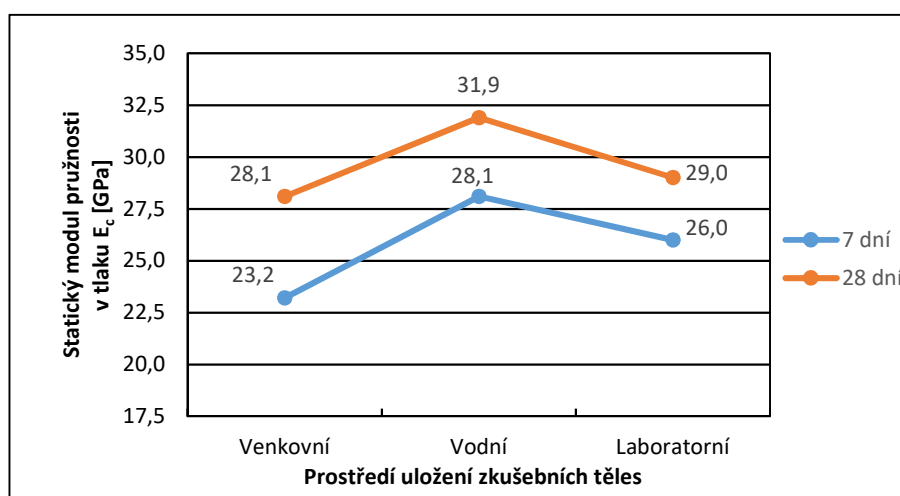
Graf 4. Zobrazení závislosti pevnosti v tlaku na modulu pružnosti v tlaku po 28 dnech

Stejně jako ve druhé receptuře i ve třetí **REC III** byla část cementu nahrazena příměsí, ovšem v tomto případě to byla jemně mletá vysokopecní struska. Objemová hmotnost se pohybovala v rozmezí od $2270 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ do $2330 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Hodnota pevnosti betonu v tlaku po 7 dnech byla překvapivě nejnižší u těles uložených ve vodním prostředí, činila 29,9 MPa, naopak nejvyšší hodnota byl zaznamenána u těles v laboratorním prostředí 36,0 MPa. Tělesa uložená v laboratorním prostředí měla nejvyšší hodnotu i po 28 dnech, konkrétně 50,1 MPa. Nejnižší hodnota po 28 dnech byla stanovena na tělech uložených ve venkovním prostředí, ta činila 46,1 MPa.

Tabulka 8. Vlastnosti ztvrdlého betonu receptury REC III

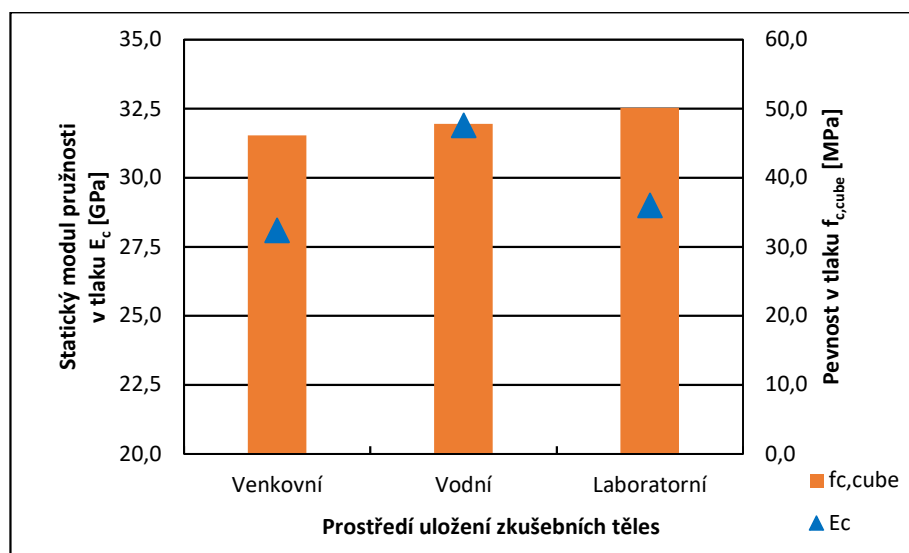
Označení receptury		REC III		
Prostředí uložení		Venkovní	Vodní	Laboratorní
Objemová hmotnost ZB D [kg·m ⁻³]	7 dní	2280	2330	2270
	28 dní	2270	2310	2300
Pevnost v tlaku f_c [MPa]	7 dní	33,4	29,9	36,0
	28 dní	46,1	47,8	50,1
Hranolová pevnost v tlaku $f_{c,beam}$ [MPa]	28 dní	39,2	49,0	40,4
Statický modul pružnosti v tlaku E_c [GPa]	7 dní	23,0	28,2	25,7
		23,3	28,0	26,2
	průměr	23,2	28,1	26,0
	28 dní	27,8	32,5	29,8
		28,3	31,2	28,1
	průměr	28,1	31,9	29,0

Při porovnání statických modulů pružnosti v tlaku se opakuje stejný parametr jako u předchozích hodnocených receptur a to ten, že nejvyšších hodnot je dosaženo u zkušebních těles uložených ve vodním prostředí a to po 7 i 28 dnech. Po 7 dnech činil rozdíl modulů pružnosti v tlaku 4,9 GPa, po 28 dnech se tento rozdíl snížil na hodnotu 3,8 GPa.



Graf 5. Srovnání hodnot statického modulu pružnosti v tlaku

Graf 6. zobrazuje, že i když je dosažena vysoká pevnost v tlaku, nemusí to automaticky znamenat vyšší hodnotu modulu pružnosti betonu. Velmi tedy záleží na způsobu ošetřování betonu. Rozdíl hodnot po 28 dnech mezi zkušebními tělesy uloženými ve vodním a laboratorním prostředí je 2,9 GPa. Ještě větší rozdíl získáme mezi zkušebními tělesy uloženými ve vodním a venkovním prostředí, ten činí 3,8 GPa.



Graf 6. Zobrazení závislosti pevnosti v tlaku na modulu pružnosti v tlaku po 28 dnech

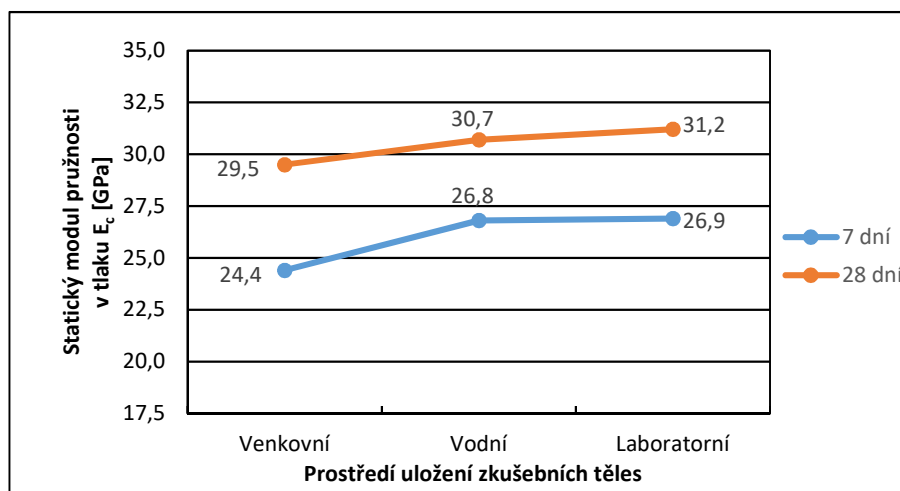
Ve čtvrté receptuře **REC IV** byla opět snížena dávka cementu příměsí, konkrétně elektrárenským popílkem z Chvaletic. Byl použit i jiný typ cementu viz kapitola 4.1.2, především s nižší pevnostní třídou 32,5.

Objemová hmotnost se pohybovala v rozmezí od $2280 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ do $2320 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pevnost v tlaku po 7 dnech byla nejvyšší u těles uložených v laboratorním prostředí a činila 43,1 MPa. Nejnižší byla opět u zkušebních těles ve venkovním prostředí 33,0 MPa. Ovšem rozdíl mezi zkušebními tělesy uloženými ve vodě a ve venkovním prostředí činil pouze 1,1 MPa. Po 28 dnech zkušební tělesa uložená ve vodním prostředí měla největší dosažené pevnosti 55,7 MPa. Zkušební tělesa uložená ve vodním prostředí dosáhla o 5,1 MPa menších hodnot. Nejmenších hodnot pak dosáhla zkušební tělesa uložená ve venkovním prostředí 43,0 MPa.

Tabulka 9. Vlastnosti ztvrdlého betonu receptury REC IV

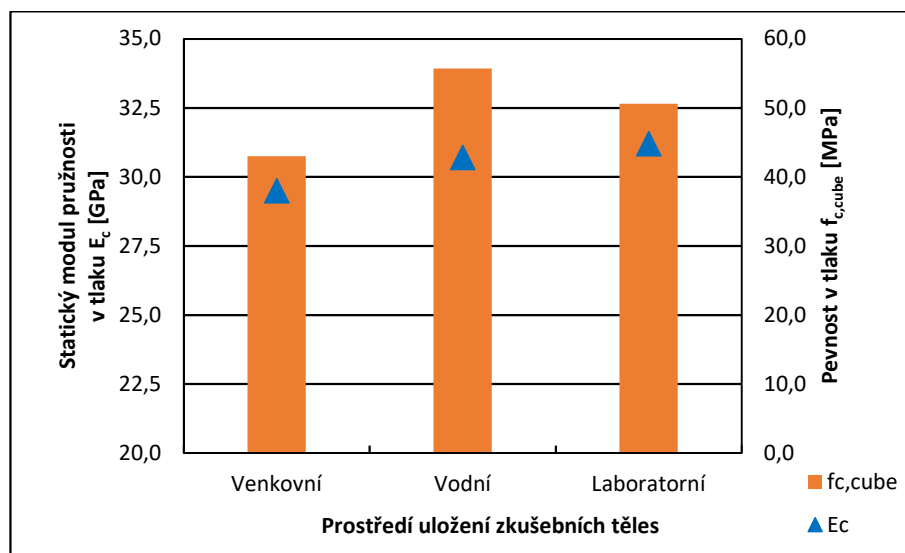
Označení receptury		REC IV		
Prostředí uložení		Venkovní	Vodní	Laboratorní
Objemová hmotnost ZB D [kg·m ⁻³]	7 dní	2280	2310	2310
	28 dní	2290	2320	2290
Pevnost v tlaku f_c [MPa]	7 dní	33,3	34,4	43,1
	28 dní	43,0	55,7	50,6
Hranolová pevnost v tlaku $f_{c,beam}$ [MPa]	28 dní	40,6	49,2	44,8
Statický modul pružnosti v tlaku E_c [GPa]	7 dní	24,0	27,0	27,4
		24,8	26,6	26,3
	průměr	24,4	26,8	26,9
	28 dní	30,2	29,8	29,9
		28,8	31,5	32,5
	průměr	29,5	30,7	31,2

Nejvyšší statický modul pružnosti v tlaku vykazují tělesa uložena v laboratorním prostředí a to po 7 i 28 dnech. Rozdíl mezi zkušebními tělesy uloženými v laboratorním a vodním prostředí po 7 dnech je nepatrný, pouze 0,1 GPa. Po 28 dnech tato hodnota mírně zvýšila na 0,5 GPa. Nejnížší hodnoty po 7 i 28 dnech vykazují zkušební tělesa uložena ve venkovním prostředí. Srovnání hodnot statického modulu pružnosti v tlaku je uvádí *graf 7*.



Graf 7. Srovnání hodnot statického modulu pružnosti v tlaku

Zkušební tělesa ve vodním prostředí po 28 dnech vykazují o 5,1 MPa vyšší hodnoty pevnosti v tlaku než zkušební tělesa v laboratorním prostředí. Statický modul pružnosti je téměř identický, liší se pouze o 0,5 GPa. Nejnížší hodnoty statického modulu pružnosti po 28 dnech mají zkušební tělesa uložená ve venkovním prostředí, zde pozorujeme i nejnižší hodnoty pevnosti v tlaku. Toto porovnání zobrazuje *graf 8*.



Graf 8. Zobrazení závislosti pevnosti v tlaku na modulu pružnosti v tlaku po 28 dnech

V *tabulce 10* je uveden souhrn všech hodnot po 28 dnech stanovených u receptur **REC I** až **REC IV** v závislosti na prostředí uložení zkušebních těles. Kde $f_{c,cube}$ značí pevnost v tlaku a E_c statický modul pružnosti v tlaku.

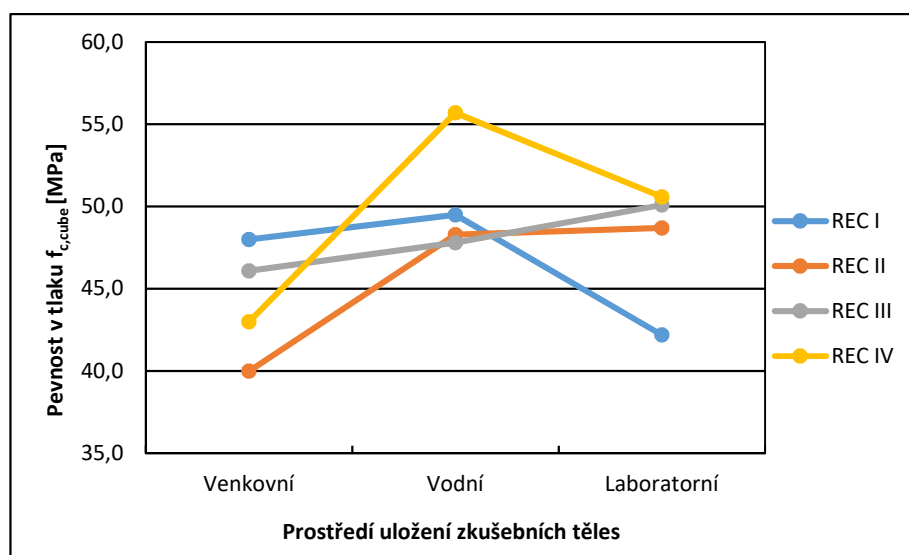
Tabulka 10. Souhrn hodnot pevností v tlaku a statických modulů pružnosti v tlaku po 28 dnech

Prostředí uložení		Označení receptury			
		REC I	REC II	REC III	REC IV
Venkovní	$f_{c,cube}$ [MPa]	48,0	40,0	46,1	43,0
	E_c [GPa]	25,5	24,1	28,1	29,5
Vodní	$f_{c,cube}$ [MPa]	49,5	48,3	47,8	55,7
	E_c [GPa]	32,5	30,7	31,9	30,7
Laboratorní	$f_{c,cube}$ [MPa]	42,2	48,7	50,1	50,6
	E_c [GPa]	27,0	28,7	29,0	31,2

Předem je nutné říci, že důvodu malého objemu míchačky, musela být míchána každá receptura dvakrát. Bylo tedy velmi důležité dodržet stejnou konzistenci u všech směsí. Při druhém míchání receptury **REC I**, nebylo dosaženo stejné konzistence a bylo použito více záměsové vody. To ovlivnilo výsledky jak statických modulů pružnosti, tak pevností v tlaku. Potvrdil se ale fakt, že vliv vodního součinitele na mechanické vlastnosti betonu je velmi výrazný.

Nejvyšší pevnost v tlaku je dosažena na zkušebních tělesech ve vodním prostředí u receptury **REC IV**, ta má hodnotu 55,7 MPa. Naopak nejnižší hodnota pevnosti v tlaku byla stanovena na zkušebních tělesech ve venkovním prostředí u receptury **REC II**, činila 40,0 MPa. Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou pevnosti v tlaku je velmi výrazný, činí 15,7 MPa.

Nejnižších hodnot všech čtyřech receptur bylo dosaženo na zkušebních tělesech uložených ve venkovním prostředí.



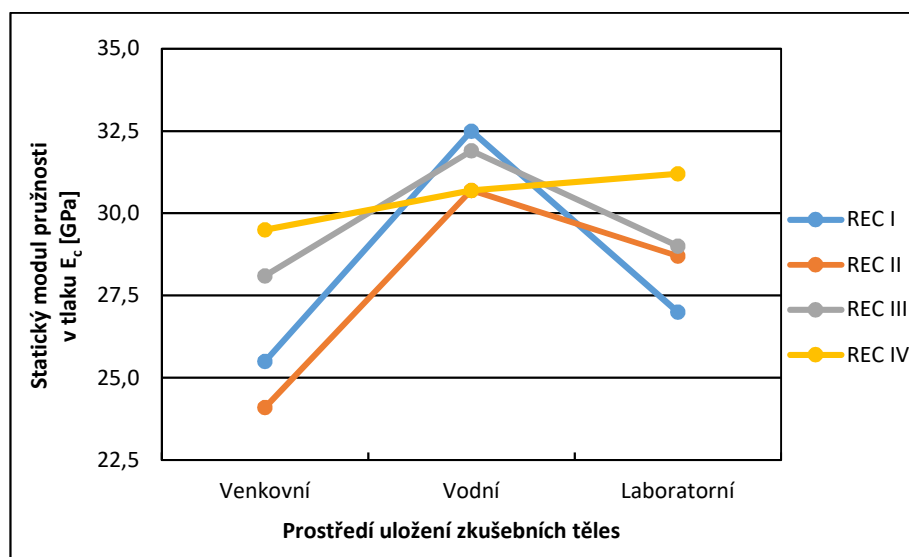
Graf 9. Porovnání hodnot pevností v tlaku všech receptur po 28 dnech

Vodní prostředí má pozitivní vliv na hodnoty pevnosti betonu v tlaku. V tomto prostředí je dosaženo vyšších hodnot. Také u laboratorního prostředí lze pozorovat nárůst pevností. U druhé receptury **REC II** jsou hodnoty laboratorního prostředí totožné s hodnoty získanými ve vodním prostředí.

Hodnoty statických modulů pružnosti mezi recepturou **REC II** a **REC III** jsou téměř identické, neliší se o více jak 4 GPa. Rozdíl mezi složením těchto receptur byl pouze v typu použité příměsi, v receptuře **REC II** byl použit elektrárenský popílek u receptury **REC III**.

byla použita jemně mletá vysokopecní struska. Můžeme tedy říci, že v tomto případě neměl vliv příměsí významný vliv.

Dalo se očekávat, že nejvyšší hodnoty statických modulů pružnosti ve všech typech prostředí budou nevyšší u receptury **REC I**, ale hodnoty receptury **REC IV** jsou podobné, ve venkovním a laboratorním prostředí jsou hodnoty dokonce vyšší. Konkrétně receptura **REC IV** ve venkovním prostředí má o 4 GPa vyšší hodnoty jak **REC I** a v laboratorním prostředí má vyšší hodnotu o 4,2 GPa.



Graf 10. Porovnání hodnot statických modulů pružnosti v tlaku všech receptur po 28 dnech

Největší statický modul pružnosti byl stanoven u receptury **REC I** ve vodním prostředí, jeho hodnota dosáhla 32,5 GPa. V této receptuře nebyla část cementu nahrazena příměsí a byl zde použit cement pevnostní třídy 42,5. Naopak nejnižší hodnota statického modulu pružnosti byla stanovena u receptury **REC II** ve venkovním prostředí, dosáhla hodnoty pouze 24,1 GPa. Nutno říci, že v této receptuře byla část cementu, stejné pevnostní třídy, nahrazena příměsí, konkrétně elektrárenským popínkem. Pokud porovnáme největší a nejmenší hodnoty statických modulů získáme rozdíl 8,4 GPa.

Dále můžeme pozorovat, že nejvyšších hodnot statických modulů pružnosti bylo téměř vždy dosaženo ve vodním prostředí. Vyjma receptury **REC IV**, kde nejvyšší hodnota byla dosažena u zkušebních těles uložených v laboratorním prostředí, nutno podotknout, že rozdíl mezi zkušebními tělesy v laboratorním a vodním prostředí byl zanedbatelný, pouhých 0,5 GPa. Nejnižší hodnoty statických modulů pružnosti vykazovala zkušební tělesa uložená ve venkovním prostředí.

5 ZÁVĚR

Úkolem teoretické části bakalářské práce bylo popsat současný stav okolo modulu pružnosti betonu, a to, které faktory ovlivňují především statický modul pružnosti betonu v tlaku. Tyto faktory můžeme rozdělit na dvě hlavní větve na technologické a zkušební. Z technologických faktorů má největší význam vliv, druh a množství použitého kameniva, protože tato složka tvoří převážnou část betonu. Čím více bude kameniva v betonu, tím větších modulů pružnosti bude beton dosahovat. Vlivem používání minerálních příměsí můžeme zlepšit některé vlastnosti betonu, ovšem to způsobí, že vzroste objem cementové pasty, tím se sníží obsah kameniva v betonu a modul pružnosti tak bude dosahovat nižších hodnot. Dalším významným vlivem je pórovitost betonu. Ať už póry nechtěně vnesené, což mohou být kaverny nedokonale ztuhlého betonu, tak póry uměle vnesené, například v provzdušněných typech betonů, snižují fyzikálně-mechanické vlastnosti, tedy i modul pružnosti betonu. Při zvyšujícím se vodním součiniteli dochází k nárůstu kapilárních pórů, které mají také negativní vliv na modul pružnosti betonu. Teplota po dobu zrání betonu má na modul pružnosti vliv především v počátečních dnech zrání. Příliš nízká teplota může zapříčinit nižší hodnoty v počátečních dnech. Ovšem s rostoucím časem se tento rozdíl snižuje.

Vhodné ošetřování má na modul pružnosti značný vliv, což bylo úkolem v experimentální části bakalářské práce. Všechna tělesa, která byla uložena ve venkovním prostředí bez ošetření, vykazovala podstatně menší hodnoty modulů pružnosti. Naopak tělesa uložena ve vodním prostředí dosahovala většinou výrazných nebo srovnatelných hodnot s tělesy uloženými v laboratorním prostředí. Jak již bylo uvedeno dříve, chybou při míchání receptury REC I došlo ke zkreslení výsledků a získané hodnoty tak nemohou být zcela rovnocenně srovnávány.

Hodnoty pevnosti v tlaku zkušebních těles v laboratorním prostředí se průměrně snížili o 5 % od hodnot pevnosti zkušebních těles uložených ve vodním prostředí. Ještě výraznější snížení pevnosti v tlaku je u těles uložených ve venkovním prostředí, ty byly průměrně nižší o 12 %. Největší hodnota pevnosti v tlaku je dosažena u receptury REC IV a u zkušebních těles uložených ve vodním prostředí, hodnota činí 55,7 MPa. U zbylých tří receptur ve vodním prostředí se hodnoty pevností pohybují v rozmezí od 47,8 MPa do 49,5 MPa, jsou tedy velmi podobné. Největší rozdíl hodnot pevností v tlaku mezi vodním a venkovním

prostředím je zaznamenán u receptury REC IV, kde tento rozdíl činí 12,3 MPa. Hodnota pevnosti v tlaku se v tomto případě snížila o 23 %.

Statický modul pružnosti zkušebních těles uložených v laboratorním prostředí klesl průměrně o 8 % od hodnot zkušebních těles uložených ve vodním prostředí. Nejvýraznější je pokles hodnot u zkušebních těles uložených ve venkovním prostředí, ty se průměrně snížily o 15 %. I když největší pevnost v tlaku byla zaznamenána u receptury REC IV, tak největší hodnota statického modulu pružnosti v tlaku byla stanovena na zkušebních tělesech ve vodním prostředí u receptury REC I, jeho hodnota činí 32,5 GPa. V porovnání s recepturou REC IV je tato hodnota vyšší o 6 %. Největší rozdíl hodnot statických modulů pružnosti v tlaku mezi vodním a venkovním prostředím je pozorován u receptury REC I, kde tento rozdíl činí 7 GPa, klesl tedy o 22 %. Nejmenší rozdíl hodnot statických modulů pružnosti je zaznamenán ve vodním prostředí a to pouze 1,8 GPa (6 %). Je tedy patrné, že vodní prostředí má pozitivní vliv na pevnost a tím zároveň i na statický modul pružnosti betonu.

V kombinaci všech parametrů, které pozitivně ovlivňují modul pružnosti, nízký vodní součinitel, vhodný druh kameniva, dokonalé zhutnění čerstvého betonu, může být dosaženo vyšších modulů pružnosti.

Činitelů, které ovlivňují modul pružnosti je však mnohem více, proto je potřebné se stále věnovat výzkumu v této oblasti a sledovat další příčiny, které parametr modulu pružnosti betonu významně ovlivňují.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Beton TKS: Technologie: Parametry betonu - specifikace, předpoklady a realita*. Praha: Beton TKS, 2017, **17**(2), 34-37 s.
- [2] VÍTEK, Jan, Jiří KOLÍSKO, Robert COUFAL, Petr HUŇKA a Michal ŠTEVULA. *Modul pružnosti betonu: Technická pravidla ČBS 05*. 1. vydání. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2016. Technická pravidla ČBS, 05. ISBN 978-80-906097-5-4.
- [3] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [4] HELA, Rudolf. *Technologie betonu: Technologie betonu I*. Brno. 2005.
- [5] KALOUSEK, Jan. *Nosné konstrukce I*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 2001.
- [6] TOPCU, Ilker a Ali UGURLU. Elasticity theory of concrete and prediction of Static E-modulus for dam Concrete using composite models. *Teknik Dergi* [online]. Ankara, 2007, **18**(1), 1115-1127 [cit. 2017-03-22]. ISSN 4055-4067. Dostupné z: <http://url.googlej.cz/n8n>
- [7] UNČÍK, Stanislav a Patrik ŠEVČÍK. *Modul pružnosti betonu*. Trnava: Betón Ráció, 2008. ISBN 978-80-959182-3-2.
- [8] AİTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.
- [9] TIA, Mang, Yanjun LIU a Danny BROWN. *Modulus of Elasticity, Creep and Shrinkage of Concrete* [online]. Florida, 2005 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/237571844_MODULUS_OF_ELASTICITY_CREEP_AND_SHRINKAGE_OF_CONCRETE. Technical Report Documentation. University of Florida.
- [10] JIRÁSKOVÁ, Iveta. *Analýza rizik navrhování staveb s ohledem na vybrané materiálové charakteristiky*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství. Vedoucí práce Petr Misák.

- [12] SOUČEK, P. In: *9. konference Technologie Betonu: Moduly pružnosti moderního betonu – předpisy, vliv složení, postupy v praxi*. Praha: ČBS Servis, 2010, s. 5-11. ISBN 978-80-87158-23-4.
- [13] NEVILLE, A.M. *Properties of concrete*. 4. New York: John Wiley, 1997.
- [14] Technologie betonu. BECHYNĚ, Stanislav. *Technologie betonu: Svazek čtvrtý: Pružnost betonu*. Praha: STNL, 1959, s. 168.
- [15] ŠAFRATA, Pavel. *Studium vlivu složení a vstupních surovin na hodnoty modulů pružnosti betonů*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Rudolf Hela.
- [16] MICKA, Martin. *Betonové konstrukce* [prezentace]. In: . b.r. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: http://mech.fd.cvut.cz/members/micka/materialy/Beton_1_prezentace.pdf
- [17] *Beton TKS: Sanace, rekonstrukce a diagnostika: Statický modul pružnosti betonu v tlaku dle ČSN ISO 6784 a ČSN EN 12390-13*. Praha: Beton TKS, 2014, **14**(3). ISSN 1213-3116.
- [21] *Beton TKS: Pozemní stavby: Studium vlivu tvaru, velikosti a způsobu přípravy zkušebního tělesa na výsledek zkoušky statického modulu pružnosti betonu v tlaku*. Praha: Beton TKS, 2011, **11**(1). ISSN 1213-3116.
- [22] ANTON, Ondřej. *Základy zkušebnictví: Návod do cvičení*. Brno: CERM, 2012.
- [24] *Beton TKS: Materiály a technologie: Modul pružnosti vs. pevnost v tlaku*. Praha: Beton TKS, 2009, **9**(2). ISSN 1212-3116.
- [25] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [26] BAJZA, Adolf a Ildiko ROUSEKOVÁ. *Technológia betónu*. Bratislava: Jaga, 2006. ISBN 80-807-6032-2.
- [27] *Beton TKS: Energetické a vodohospodářské stavby: Modul pružnosti vysokopevných betonů různého složení*. Praha: Beton TKS, 2010, **10**(5). ISSN 12133116.
- [28] *Beton TKS: Mosty a dopravní stavby: Vliv obsahu vzduchu ve ztvrdlém provzdušněném betonu na hodnotu statického modulu pružnosti a pevnosti v tlaku stanovené ndt metodami*. Praha: Beton TKS, 2011, **11**(4). ISSN 12133116.

- [29] BLAŽEK, Michal. *Vliv počátečních podmínek na modul pružnosti mostního betonu*. Brno, 2012, 58 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Petr Cikrle.
- [34] *Průručka technologa-Beton: Suroviny-výroba-vlastnosti*. 1. vydání. Českomoravský cement, 2013.

7 SEZNAM POUŽITÝCH NOREM

- [11] ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČNI, 2006.
- [18] ČSN ISO 6784. *Beton. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: ČNI, 1993.
- [19] ČSN EN 12390-13. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku*. Praha: ČNI, 2014.
- [20] ČSN ISO 1920-10. *Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. 1. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [23] ČSN EN 206. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [30] ČSN EN 12350-1. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 1: Odběr vzorků*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [31] ČSN EN 12390-1. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [32] ČSN EN 12390-2. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [33] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [35] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [36] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2009.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ČB	Čerstvý beton
ZB	Ztvrdlý beton
DTK	Drobné těžené kamenivo
HDK	Hrubé drcené kamenivo
REC I-IV	Označení příslušné receptury
S1-S5	Stupeň konzistence čerstvého betonu stanovená sednutím kužele
k-hodnota	Součinitel zohledňující typ použité příměsi
D	Objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
E_c	Statický modul pružnosti v tlaku [GPa]
$f_{c, \text{beam}}$	Pevnost betonu v tlaku stanovená na trámciích [MPa]
$f_{c, \text{cube}}$	Pevnost betonu v tlaku stanovená na krychlích [MPa]
w/c	Vodní součinitel [-]
ε_a	Průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí [-]
ε_b	Průměrné poměrné přetvoření při základním zatěžovacím napětí [-]
σ_a	Horní zatěžovací napětí [MPa]
σ_b	Základní napětí [MPa]

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.	Přehled jednotlivých složek betonu.....	12
Obrázek 2.	Základní typy pracovních diagramů.....	13
Obrázek 4.	Vyjádření sečnového modulu pružnosti E_{cm} pomocí deformačního diagramu betonu v tlaku	15
Obrázek 5.	Grafické krabicové zobrazení zkoušek statického modulu pružnosti v tlaku dle ČSN ISO 6784 a ČSN EN 12390-13.....	18
Obrázek 6.	Umístění snímačů deformací na zkušebním tělese	19
Obrázek 7.	Zatěžovací cyklus při měření statického modulu pružnosti v tlaku	20
Obrázek 8.	Deformace pro kamenivo, beton a cementovou pastu	21
Obrázek 9.	Deformace kameniva a cementové pasty při stejném napětí (sériový model)	22

Obrázek 10. Napětí působící na kamenivo a cementovou pastu při stejné deformaci (paralelní model)	22
Obrázek 11. Faktory ovlivňující modul pružnosti betonu	23
Obrázek 12. Předpovězené hodnoty modulu pružnosti betonu v závislosti na hodnotách modulu pružnosti hrubého kameniva a na hodnotách pevnosti betonu v tlaku	25
Obrázek 13. Porovnání hodnot modulů pružnosti s příměsí.....	25
Obrázek 14. Znázornění závislosti statického E_c a dynamického E_{bu} modulu pružnosti na obsahu vzduchu	26
Obrázek 15. Vliv vodního součinitele a ošetřovacích podmínek na modul pružnosti betonu	27
Obrázek 16. Vývoj statického E_c a dynamického $E_{dyn,U}$ modulu pružnosti betonu v čase	29
Obrázek 17. Srovnání betonu jedné pevnostní třídy na zkušebních tělesech různého tvaru a typu zakončení.....	31
Obrázek 18. Znázornění postupu návrhu receptury.....	32
Obrázek 19. Znázornění postupu výroby čerstvého betonu a výroby zkušebních těles	36
Obrázek 20. Rozměry formy a stanovení sednutí kužele	37
Obrázek 21. Znázornění postupu prováděných zkoušek na ztvrdlém betonu	38
Obrázek 23. Vyhovující porušení krychlí.....	39
Obrázek 24. Osazení zkušebního hranolu měřicím zařízením	40
Obrázek 25. Znázornění vyhodnocení prováděných zkoušek	40

10 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Rozdělení metod zjišťování modulu pružnosti.....	16
Tabulka 2. K_0 faktor pro typ kameniva	24
Tabulka 3. Složení navržených receptur na 1 m ³ betonu.....	35
Tabulka 4. Zatřídění sednutí kužele.....	37
Tabulka 5. Vlastnosti čerstvého betonu receptury všech receptur	41
Tabulka 6. Vlastnosti ztvrdlého betonu receptury REC I.....	42
Tabulka 7. Vlastnosti ztvrdlého betonu receptury REC II	44
Tabulka 8. Vlastnosti ztvrdlého betonu receptury REC III	46

Tabulka 9. Vlastnosti ztvrdlého betonu receptury REC IV	48
Tabulka 10. Souhrn hodnot pevností v tlaku a statických modulů pružnosti v tlaku po 28 dnech.....	49

11 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1. Srovnání hodnot statického modulu pružnosti v tlaku	42
Graf 2. Zobrazení závislosti pevnosti v tlaku na modulu pružnosti v tlaku po 28 dnech	43
Graf 3. Srovnání hodnot statického modulu pružnosti v tlaku	44
Graf 4. Zobrazení závislosti pevnosti v tlaku na modulu pružnosti v tlaku po 28 dnech	45
Graf 5. Srovnání hodnot statického modulu pružnosti v tlaku	46
Graf 6. Zobrazení závislosti pevnosti v tlaku na modulu pružnosti v tlaku po 28 dnech	47
Graf 7. Srovnání hodnot statického modulu pružnosti v tlaku	48
Graf 8. Zobrazení závislosti pevnosti v tlaku na modulu pružnosti v tlaku po 28 dnech	49
Graf 9. Porovnání hodnot pevnosti v tlaku všech receptur po 28 dnech	50
Graf 10. Porovnání hodnot statického modulu pružnosti v tlaku všech receptur po 28 dnech	51